

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки

(повна назва кафедри)

«На правах
рукопису» УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

(код і назва)

на тему: Фотодіод ІЧ-діапазону на основі монокристалу InSb

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи ДП-82мп

(шифр групи)

Шимко Гліб Юрійович

_____ (прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник доц., к.т.н., Мачулянський О.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант з нормоконтролю

(назва розділу)

доц., доц., к.т.н. Орлов А.Т.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Консультант з інформаційних питань ст. викл., к.т.н. Діденко Ю.В.

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент доц. каф. електронної інженерії, к.т.н. Казміренко В.А.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2019року

Реферат

Пояснювальна записка до дипломної роботи містить: 92 сторінок, 28 таблиць, 16 рисунків, 33 бібліографічних найменування.

У цій роботі досліджено та впроваджено дослідницьку роботу щодо утворення фотодіодів на основі монокристалів InSb шляхом іонної імплантації.

Технічний шлях утворення фотодіодів на основі монокристала InSb шляхом імплантації іонами, тобто апаратом, в якому виконується процес формування області рп-з'єднання, тобто підготовка пластини початкового кристала антимоніду індію, імплантація іона, одиночного InSb після імплантації Кристалічний допінг. Також було розглянуто моделювання та редагування оптимальних технічних шляхів для цих процесів з подальшим аналізом та порівнянням готового зразка та його характеристик.

Ключові слова: іонна імплантація, монокристал, антимонід індія, фотодіод.

Abstract

The work contains 61 pages, 7 figures, 6 tables, 33 bibliographic titles.

This work investigates and implements research on the formation of photodiodes based on InSb single crystals by ion implantation.

The technical way of formation of photodiodes on the basis of InSb single crystal by implantation with ions, that is, the apparatus in which the process of formation of the region of pn junction is performed, ie preparation of the plate of indium antimonide initial crystal, implantation of a single InSb crystal after implantation Crystalline doping. Modeling and editing of the optimal technical paths for these processes were also considered, with further analysis and comparison of the finished sample and its characteristics.

Keywords: ion implantation, the monocrystal, an indium antimonide, photodiode.

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	5
ВСТУП.....	6
1. Фотоприймачі ІЧ діапазону	7
1.2. Пристрої для прийому сигналу середнього ІЧ діапазону.....	8
1.3. Фотодіоди для середнього ІЧ діапазону.....	12
2. Фізико-технологічні аспекти виготовлення p-n переходів в монокристалах InSb методом іонної імплантації.....	14
2.1. Вплив іонної імплантації Be та Mg на структурні властивості опроміненої області.....	14
2.2. Тип перетворення механізму активації InSb, який використовується для передачі іонів.....	18
2.3. Термічний відпал іонно-імплантованих конструкцій.....	25
2.4. Вдосконалення базової технології.....	29
2.5. Обробка поверхні підкладок InSb.....	33
2.5.1. Абразивна обробка поверхні підкладок.....	33
2.5.2. Неполірувальний спосіб підготовки субстрату.....	41
3. Альтернативне джерело імплантації іонів.....	47
4. Моделювання процесу іонної імплантації.....	50
4.1. Теорія Линдхарда-Шарфа-Шіотта.....	50
4.2. Розрахунок пробігів та профілів впроваджуваної домішки методом Монте-Карло.....	51
5. Технологічний маршрут процесу іонної імплантації.....	53
6. Аналіз практично отриманих зразків.....	61
7. Розробка стартап-проекту.....	72
Висновки.....	89
Список літератури.....	90

Перелік скорочень

ВІМС – вторинна іонна мас-спектрометрія

ННЗ – неосновні носії заряду

ОНЗ – основні носії заряду

ІФВ - імпульсний фотонний відпал

ЕВІС метод - струму, наведеного електронним пучком

МДН – структура метал-діелектрик-напівпровідник

ХМП - хіміко-механічного полірування

ХДП - хіміко-динамічним поліруванням

ВАХ – вольт-амперна характеристика

ОПЗ – область просторового заряду

ВФХ – вольт-фарадні характеристики

АОП – анодне окислення підкладки

ІЧ – інфрачервоне випромінювання

Вступ

Монокристалічні фотодіоди антимоніду індію широко використовуються для виявлення інфрачервоного випромінювання (ІЧ) в спектральному діапазоні 3-5 мкм [1]. Найбільша перевага перед фотодіодами, виготовленими з матеріалів $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x = 0,3$), - це поліпшена стабільність, технологічність та цілісність конструкцій монокристалічних матеріалів. Незважаючи на те, що монокристалічні фотокристалічні антимонідні індії виготовлялися протягом багатьох років [2, 3], проблема вдосконалення основних технічних параметрів та характеристик залишається важливою. Крім того, наприкінці 50-х років ІЧ-датчиків на основі антимоніду індія набули популярності у військовій промисловості, фотоприймачі були сконструйовані та виготовлені не лише фоторезистами, але і фотодіодами. Наприклад, використання цих фотодіодів полягало в дооснащенні головки навішування ракети «повітря-повітря» Sidewinder [1, 8]. На сьогоднішній день фотодіоди з охолодженням InSb та їх багатоелементні фокальні масиви використовувались у головках самонаведення для ракет «земля-повітря» 9М37, переносних протиповітряних ракетних комплексах «Ігла» та протиповітряних ракетних комплексів «Стріла-10». Крім того, є інформація про розробку фотодіодів InSb , які можуть працювати при кімнатній температурі [9]. Це показує перспективи використання в оптоелектронних газоаналізаторах з найінтенсивнішою смугою поглинання від 2 до 5 мкм [10]. В даний час актуальним завданням в медицині є використання фотодетекторів InSb в тепловізійному обладнанні високої роздільної здатності для ранньої діагностики раку [11, 2]. Раніше дифузія була основним методом виготовлення InSb фотодіодів, але з розвитком виробництва іонної імплантації вона почала домінувати, особливо у технологіях виготовлення багатоелементних лінійок і фокальних матриць [13-15].

1. Фотоприймачі ІЧ діапазону

1.1 Область застосування інфрачервоного випромінювання.

У сучасному світі оптоелектронні прилади, що працюють в інфрачервоному (ІЧ) діапазоні випромінювання, який умовно поділяють на 3 області: ближній ІЧ (0.75-2.5), середній ІЧ (2.5-50), дальній ІЧ (50 мкм - 2 мм), широко використовується в різних сферах людської діяльності. Активно розробляються і створюються прилади для наукової, медичній галузях, для систем зв'язку і військової справи. Наприклад, для військового застосування створені прилади нічного бачення - оптоелектронні прилади, що забезпечують зображення об'єкта при недостатній освітленості. Працюють в області ближнього ІЧ, а також слабого видимого світла. Реалізуються на електронно-оптичних перетворювачах і вимагають для роботи підсвічування ІЧ світлодіодами; інфрачервона термографія - зображення в інфрачервоних променях, що показує розподіл температурних полів. Охоплює область середнього ІЧ (до 14 мкм). Область температур обмежується -50 ... 500 °С. Не потребує зовнішнього освітлення; інфрачервона головка самонаведення - пристрій, вловлюють хвилі ІЧ діапазону. Являє собою оптоелектронний прилад, що ідентифікує мету на навколишньому фоні. У науковій галузі створюються прилади для систем ІЧ спектроскопії. ІЧ спектроскопія - розділ спектроскопії, що охоплює середню і довгохвильову область. Спектри виникають в результаті переходів між коливальними рівнями стану молекул, при цьому спостерігається зниження інтенсивності світла, що проходить, що свідчить про наявність в молекулі функціональних груп. Наприклад, для газу CO довжина хвилі при якій відбувається поглинання, дорівнює 4.7 мкм. У медичній галузі використовується в датчиках потоку крові і вимірі насичення крові 6 киснем. Широко застосовуються оптоволоконні лінії зв'язку, які підставляють собою зв'язок між джерелом оптичного випромінювання (напівпровідниковим лазером або світлодіодом) і приймачем (фотодиодом) через оптичне волокно, що працюють в діапазоні довжин хвиль 1.3-1.55 мкм, оскільки в цьому діапазоні втрати сигналу мінімальні. У таких оптичних системах швидкодіючі фотодетектори є

найважливішим елементом при створенні подібних систем.

1.2. Пристрої для прийому сигналу середнього ІЧ діапазону.

Для ефективного вирішення цих завдань необхідні фотоелектронні пристрої, які могли б реєструвати мінімально можливий оптичний сигнал. Отже, основну роль в такому приладі грають порогові характеристики фотоприймача, тому що саме вони визначають значення малих сигналів, близьких до рівня шуму. Фотоприйемники характеризуються такими параметрами, як чутливість, шуми, спектральна характеристика, величина фотоструму, інерційність, порогова потужність, обнаружительная здатність. Розглянемо докладніше ці параметри. Чутливість. Розрізняють чутливість по струму і по напрузі. Це величина, що характеризує зміну струму або напруги при одиничному зміні потужності у зовнішній ланцюга фотоприймача.

$$S_I = \frac{\Delta I}{\Delta P} \quad (1)$$

$$S_u = \frac{\Delta U}{\Delta P} \quad (2)$$

Шуми - це хаотичний сигнал з випадковою амплітудою і спектром. Є невід'ємною частиною кожного приладу і не дозволяє детектувати як завгодно малі сигнали.

Спектральна характеристика являє собою залежність фотоструму в ланцюзі приладу від довжини хвилі падаючого світла. для великих довжин хвиль вона визначається шириною забороненої зони (червона межа фотоефекту), тоді як для малих довжин хвиль визначається в основному поверхневої рекомбінацією і товщиною базової області [3]. Фотострум пропорційний числу фотонів N з довжиною хвилі λ , падаючих на поверхню напівпровідника. Енергія фотона

$$E_{\Phi} = \frac{hc}{\lambda} \quad (3)$$

Кількість фотонів, падаючих на ФП за одиницю часу дорівнює

$$N = \frac{P}{E_{\phi}}, \quad (4)$$

де P - потужність потоку. Оскільки не кожен фотон призводить до народження електроннодірочної пари, введемо коефіцієнт η , який показує ефективність перетворення. $N' = \eta N$. N' - число фотонів, що створюють струм в ланцюзі. остаточно маємо

$$\begin{aligned} \square\square\square\square & \quad (5) \\ \square\phi &= h\nu \end{aligned}$$

Фотодіод лінійно перетворює падаючу потужність сигналу P в електричний сигнал - фотострум I_{ϕ} .

Інерційність один з найважливіших параметрів фотодіодів. Виділяють 3 фактори, що впливають на інерційність: час дифузії або дрейфу неосновних носіїв через базу, час прольоту p - n переходу, час перезарядки ємності p - n переходу. У простих фотодиодах, інерційність переважно визначається часом прольоту бази, ці часи порядку наносекунд. Порогова потужність - це мінімально можливий оптичний сигнал, що генерує фототок. вона дорівнює середньоквадратичного струму власних шумів $\sqrt{I^{-2}}$ і залежить від площі. Тому фотодіоди порівнюють з питомою порогової потужності $P_{\text{пор}}^*$. Обнаружительная здатність є величиною, зворотної величині порогової потужності.

$$D^* = P_{\text{пор}}^* = \frac{\sqrt{S \cdot \Delta f}}{P} \frac{U_s}{U_n} \left[\frac{\text{см} \cdot \text{Гц}^{\frac{1}{2}}}{\text{Вт}^{-1}} \right], \quad (6)$$

де S - площа активної майданчики напівпровідника, U_s/U_n – відношення дійсних значень сигналу і шуму.

Фотоелектронні пристрою можна розділити на 3 типи, які використовують різні явища: зміна електропровідності при освітленні - внутрішній фотоэффект; виникнення ЕРС на кордоні двох матеріалів під дією світла - фотоэффект в

замикаючому шарі; випускання речовиною електронів під дією світла - зовнішній фотоэффект. Обмежимося розглядом тільки приладів на внутрішньому фотоэффекті. Перший фотоприймач, що працює на внутрішньому фотоэффекті, став фоторезистор. У фоторезисторах використовується ефект збільшення провідності під дією світла. Механізм виникнення фотопровідності наступний: при температурі відмінно від нуля в обсязі напівпровідника є вільні носії заряду. При висвітленні світлом приладу певною довжиною хвилі генеруються додаткові електронно-діркові пари (для випадку власного напівпровідника), тим самим збільшується концентрація носіїв і, відповідно, провідність [4]. Збільшення концентрації відбувається не відразу, а підкоряється експонентному закону

$$\Delta n = \alpha \beta \tau N \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (7)$$

де N - число фотонів, β - квантовий вихід, що визначає число носіїв заряду, що утворюються при поглинанні 1 фотона, α - коефіцієнт поглинання.

При відключенні джерела освітлення, концентрація носіїв також по експонентному закону повертається в стаціонарний рівень

$$n = \Delta n e^{-\frac{t}{\tau}} + n_0 \quad (8)$$

До переваг фоторезисторів можна віднести високу граничну чутливість (CdS 1013 в області видимого випромінювання, PbS 1010 для ближнього і середнього ІК), можливість роботи в колах постійного і змінного струму. Головним недоліком є його висока інерційність. Типові часи наростання і спаду імпульсу фотоструму ~ десятки мс.

Наступним типом фотоприймачів стали фотодіоди. Базовими конструктивними елементами будь-якого фотодіода є контактні області між двома матеріалами. Існує кілька типів переходів: між двома областями напівпровідника, з різною концентрацією і складом легуючої домішки; між напівпровідниками двох різних складів; контакт метал напівпровідник; контакт метал діелектрик.

Можливі два режими роботи фотодіода: фотогальванічний - без зовнішньої

напруги зсуву (вентильний режим) і фотодіодний - із зовнішнім зворотним зміщенням.

Принцип роботи фотодіода в вентильному режимі. При відсутності світлового потоку на кордоні p - n переходу створюється контактна різниця потенціалів. Через перехід назустріч один одному протікають два струму – $I_{др}$ і $I_{диф}$, які врівноважують один одного. При висвітленні p - n переходу фотони, проходячи в товщу напівпровідника, повідомляють частини валентних електронів енергію, достатню для переходу їх в зону провідності, тобто за рахунок внутрішнього фотоефекту генеруються додаткові пари електрон-дірка. Під дією контактної різниці потенціалів p - n переходу неосновні носії заряду n -області - дірки переходять в p - область, а неосновні носії заряду p -області - електрони - в n - область.

Дрейфовий струм отримує додаткове збільшення, зване фотострумом. Дрейф неосновних носіїв призводить до накопичення надлишкових дірок в p -області, а електронів в n -області, це призводить до створення на затискачах фотодіода при розімкнутому зовнішньому ланцюзі різниці потенціалів, званої фото-ЕРС Потенційний бар'єр переходу, як і при прямій напрузі, зменшується на величину фото-ЕРС, яка називається напругою холостого ходу U_{xx} [5].

У режимі фотодіода при відсутності світлового потоку і під дією назад прикладеної напруги через фотодіод протікає звичайний початковий зворотний струм I_0 , який називають темновим. Темновий струм обмежує мінімальне значення світлового потоку. при висвітленні фотодіода кванти світла додатково виривають електрони з валентних зв'язків напівпровідника, збільшуючи тим самим потік неосновних носіїв заряду через p - n перехід. Чим більше світловий потік, що падає на фотодіод, тим вище концентрація неосновних носіїв заряду поблизу запірного шару, і тим більший фотострум, який визначається напругою зовнішнього джерела і світловим потоком, протікає через діод [6].

Для підвищення швидкодії і чутливості фотодіодів застосовуються

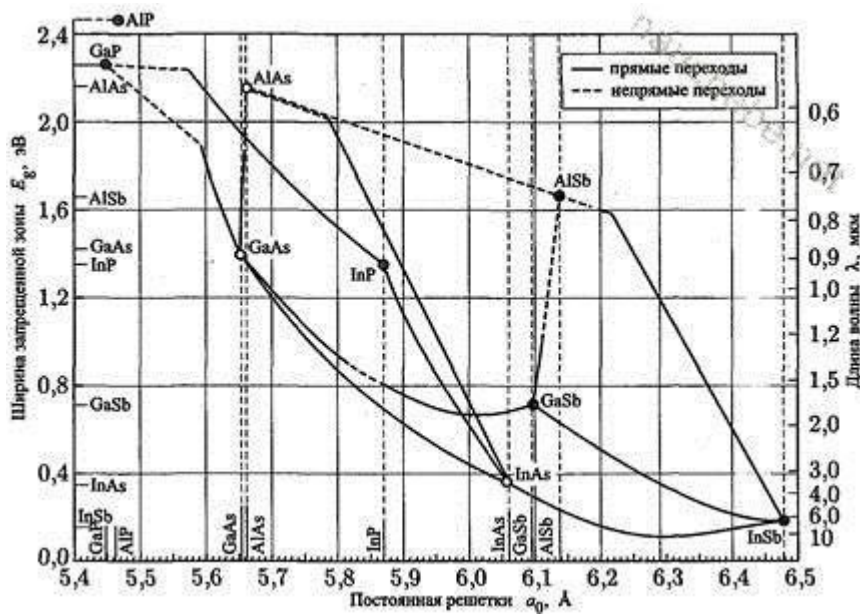
структури типу $p - i - n$, широкий внутрішній шар якої забезпечує найбільшу ймовірність поглинання входять фотонів. Високий опір i -області забезпечує падіння напруги переважно на ньому. Результуюче електричне поле підвищує швидкість ФОТОВідповідь і зменшує шум. В результаті швидкодія таких фотодіодів значно зростає, а гранична частота має величину $\sim 10^9 - 10^{10}$ Гц.

1.3. Фотодіоди для середнього ІЧ діапазону.

Матеріали, на яких можна реалізувати фотоприймачі для потрібного нам діапазону довжин хвиль (1-5 мкм), знаходяться з групи сполук A_3B_5 (див малюнок 1). З простих бінарних сполук маємо арсенід індію (ширина забороненої зони 0.35 eV), антимонід галію (ширина забороненої зони 0.7 eV). В роботі [7] були вирощені шари

$n - \text{InSb}$ на $p - \text{InSb}$ підкладці. На основі отриманих $p - n$ структур був створений фотоприймач і досліджені його характеристики при різних температурах. Так, при температурі рідкого азоту, обнаружительная $D^* = 1.2 \cdot 10^{11} \text{ см}^2 \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$, при кімнатній температурі знижувалася на 2 порядки. Була показана перспективність даної технології для створення високоефективних фотодіодних структур.

З подальшим розвитком технологій популярність здобули фотоприймачі, на основі багатокомпонентних твердих розчинів. Змінюючи склад твердого розчину, можна варіювати такі параметри напівпровідника як постійна решітки, ширина забороненої зони та ін. На малюнку 1 представлена діаграма залежності забороненої зони від періоду решітки. Точками позначаються бінарні сполуки типу A_3B_5 . Лінії, що



з'єднують два з'єднання, є зображеннями потрійної системи. Ці ж лінії обмежують області існування четверні систем. Найбільш перспективними з з'єднань $A3B5$ є $InAs$, $GaSb$ (для діапазону 1-5 мкм). Завдяки застосуванню багатокомпонентних твердих розчинів, з'явилася можливість створення так званих «Широкозонних вікон». Поверхня напівпровідника є приватним випадком дефекту, отже, в цій області буде відбуватися інтенсивне поглинання світла. Щоб забезпечити поглинання безпосередньо в області p - n переходу, нарощують додатковий ширококутного шар, близький по параметру решітки, таким чином поліпшуються характеристики фотоприймача.

Рис 1. Взаємозв'язок між величиною забороненої зони E_g і параметром решітки напівпровідникових матеріалів типу $A3B5$

2. Фізико-технологічні аспекти виготовлення p - n переходів в монокристалах $InSb$ методом іонної імплантації

2.1. Вплив іонної імплантації Be та Mg на структурні властивості опроміненої області

Процес структурної модифікації на поверхні монокристала $InSb$ важливіший з точки зору з'ясування природи перетворення типу провідності при формуванні p - n переходу в залежності від умов провідності. Складність процесу перетворення іонної імплантації. На додаток до імпантованих допантами типу акцепторного типу, таких як берилій та магній, утворюються радіаційні дефекти донорського типу, що значно впливають на процес перетворення матеріалу в поверхню поверхневої поверхні. Встановлено аномальний характер радіаційного ураження монокристалів $InSb$ під час імплантації іонів [16-19], а неопромінена межа - поверхня опроміненої поверхні має висоту h шару, ураженого радіацією. Показано, що з'являється крок, який перевищує порядок Si Ge , $GaAs$ на один або кілька порядків за тих же умов імплантації [16, 17]. Ефект збільшення (розширення) обсягу під час опромінення матеріалу спостерігається за допомогою «гойдання».

Було встановлено, що h залежить від типу легуючого іона, його енергії E , дози Φ та цільової температури t_m . Для енергетичного діапазону від 40 до 200 кЕВ, дози $m = 20^\circ \text{C}$, та $1, 10^{14}$ - $2, 10^{15} \text{ см}^{-2}$, значення h можна наблизити так:

$$h = A \cdot E m \Phi^2 / 3, \quad (9)$$

Де A - коефіцієнт, що залежить від атомної маси іона M та показника $m \cong 1$. Наприклад, у випадку іонів $E = 50 \text{ кЕВ Mg}^+$, діапазон доз $(0,2-2,0) \cdot 10^{15} \text{ год}$. Значення см^{-2} змінюється в діапазоні від $0,015$ до $0,11 \text{ мкм}$, а у випадку $E = 100 \text{ кЕВ}$ інтервал зміни становить $0,03$ встановлюється на $0,20 \text{ мкм}$ [16, 17]. Порівнюючи швидкість травлення опроміненого матеріалу зі швидкістю травлення вихідного матеріалу в поганому розчині соляної кислоти, ми заявляємо, що опромінений матеріал на два порядки вище. Цей факт вказує на те, що останній має сильне розупорядкування. Крім того, досягається висока швидкість травлення до глибини h_1 , що значно вище h . Тому шар глибини $h + h_1$ вважається шаром з сильною пошкодженням радіації, а значення $= h / h + h_1$ являє собою зміну фактичної щільності матеріалу при опроміненні. Значення, відображене 1 , вказує на необоротні зміни структури опроміненого матеріалу. Видно, що відпал опроміненого InSb при 480°C мало впливає на h . Дослідження за допомогою електронного мікроскопа неправильних шарів, імплантованих іонами Mg^+ з енергією 100 кЕВ до дози $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, показало, що кристалічна структура InSb не змінювалася. Коли доза збільшувалася до $3 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, електронна дифракційна картина демонструвала дугову точку відбиття, що показує утворення глибокого тканинного шару InSb . • При дозах $3, 10^{15} \text{ см}^{-2}$ орієнтована мікрокристали порушена. Аналогічні ефекти спостерігалися і для іонів з температурою понад 100 кЕВ . Крім того, було встановлено, що для іонів $s 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ та електронів 100 кЕВ є характерне відображення в структурі верхівки з відображенням сфалеридної структури. Дослідження морфології поверхні, що піддається впливу іонів Mg^+ , призводить до появи шорсткої поверхні, колір поверхні спочатку матовий, а сильно невпорядкована зміна відбивної здатності InSb збільшує дозу коричнево-сірого. Після термічного відпалу, який спрямований

на усунення структурних дефектів, в імплантованій поверхні не відбувається істотних змін. Значення H при високій енергії та високій дозі в кілька разів перевищує очікуваний діапазон іонів R_p . Основна відмінність поведінки імплантованого InSb та інших матеріалів, таких як Si, Ge, GaAs, обумовлена фізичними та механічними властивостями вихідного матеріалу, а дефекти точкового випромінювання є досить рівномірними для всіх радіаційних випромінювань [16]., [17]. Утворення пружних деформацій при опроміненні та їх модифікація пластичною деформацією призводить до утворення порожнеч, які створюють пори та підвищують рівень пружно-механічної деформації. Потім це перетворення напруги відбувається під час етапу формування мозаїки, за яким слідує текстуровані кристали та полікристали. Тому поверхневий шар під час імплантації може представляти собою суміш аморфної та полікристалічної фаз InSb, яка не може бути зведена до монокристалічної структури шляхом відпалу. Як показано в дослідженні, аморфна фаза складається з нестехіометричних сполук In і Sb та продуктів реакції з адсорбованими сторонніми атомами. Інтенсивність та еволюція етапу модифікування опроміненої поверхні InSb, мікроскопічний розподіл концентрації пор по шарах, мозаїчність та розмір кристалітів визначаються умовами імплантації. Коли на поверхню InSb імплантують іони магнію енергією 200 кЕВ та дозою $3,1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ через анодний товщиною аноду товщиною 0,03-0,06 мкм, год на незахищеній поверхні знижується з 0,1 мкм до 0,06 мкм . до вас. Захищений. Це значення h відповідає дозі $2,1 = 2,1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ [17]. Це важливо для методу імплантації при формуванні p-n переходу. Для зменшення глибини неупорядкованого шару InSb доцільно захищати поверхню тонким діелектричним шаром до перенесення іонів, використовуючи іони високої енергії. Подальше дослідження структурних властивостей шару імплантації іонів InSb наведено у розділах [18, 19]. Використання переносного електронного мікроскопа для дослідження шарів InSb послідовності ін'єкцій підтвердило

1) наявність двошарової неправильної структури. Верхній шар сильно порушений, багатий нанопорами, $\sim R_p$ і не має структурних порушень. С; нижній

невпорядкований шар має інтерстиціальні та дислокаційні петлі типу вакансії, дислокаційні сітчасті ділянки, поодинокі дислокації від бічних джерел свинцю, товщина шару $\sim 10R_p$ та його структура Термопарі значно покращують фізичні та фізичні властивості.

- 2) Утворення сферичних пір незалежно від типу іонів та енергії. Відсутність поля еластичної деформації в кінцевій фазі неправильного формування шарів;
- 3) наявність латентного періоду в утворенні пір і відповідна доза (Φ_i) наприкінці цього періоду залежить від типу зростаючої маси іонів за інших рівних умов.
- 4) Густина пор досягає насичення майже вдвічі, ніж Φ_i . Збільшення дози ще більше збільшує розмір пор, але не збільшує щільність. Іншими словами, збільшення заповнення пор пов'язано із збільшенням розмірів.
- 5) При менших дозах центри сфероїдальних пор розташовані майже на тому ж рівні, що і відповідна площа зразка води; в одному зразку розмір пор у приміщенні становив $2 \cdot 10^{10}$ – 10^{11} см² - 2 різних;
- 6) на рівні імплантації, тобто за відсутності пір у рідкій та еластичній формах, але при дозах $\Phi \geq 2\Phi_i$ тиск взагалі зникає; крім того, кінець періоду входження пор збігається з початком розширення дренажної системи;
- 7) Пори центри були сформовані вперше в найглибшій точці іонного шляху R_p , з достатньою енергією іонів Mg^{+} та дозами $6,2 \times 10^{13}$ см⁻² в неорганічному шарі InSb з двома циліндричними порами діаметром ~ 108 см⁻², що становить від ~ 10 до 200 нм;
- 8) крім утворення пір і аморфізації надлишку InSb також можлива конверсія сфалеридної фази у вурсид;
- 9) Після зволоження ділянки InSb іоном Mg^{+} при 35 кВ та дозі $6 \cdot 10^{14}$ см⁻² при 20 ° С недавня інкубація з $T = 350$ ° С, захищена SiO₂, дала журнал вивільнення приблизно 0,025. –0,073 мкм при $\sim 4 \cdot 10^{14}$ см⁻³, зі зміною енергії іонів до 180 кВ і $\Phi = 10^{14}$ см⁻², виведеної з петлі при 0,11 мкм при інзелело $9 \cdot 10^{14}$ см⁻³, ще більше зросла. Дози до $2 \cdot 10^{15}$ см⁻² приводять до мережі безперервної передачі з щільністю зсуву $51,5 \cdot 10^9$ см⁻³;

10) Було встановлено, що маса імпантованого іона 14 не поглинається InSb, що могло б послужити керівництвом до їх вибіркості для досягнення типу провідності та істотного зниження щільності щільної області.

Утворення вакансій і пір в InSb при введенні іонів відбувається за рахунок вакуумних вакансій, що утворюються під час опромінення [16-19]. Цей процес можна розглядати як вирішення втрати робочих місць та другої стадії, втрати часу. Для завершення постанови із зазначенням граничного терміну подання необхідна повна ступінь передачі. Коли ця проблема порушена, внутрішні атоми переміщуються в клітини, тобто поверхню зразка, і більшість вакансій створюють вакансії та пори, після чого швидкість заміщення зменшується. Наявність часу інкубації до утворення пор вказує на необхідність усунення дефектів під певним кутом нахилу. Відомо, що профіль тиску для розповсюдження магнітного дефекту InSb виконаний з металу, тому пікову швидкість слід очікувати в кінцевій точці величини, що відповідає справжньому відображенню нанорозмірної нанорозмірної шкали при p R_p у початковій фазі їх утворення. Пророчені пори займають місце у всіх імпантатів, що запобігає утворенню нових пор за рахунок збільшення їх розмірів. Цей факт підтверджується тим, що дози опромінення не залежать від порного тиску і що після періоду нанесення спостерігається значне зниження механічного тиску. Зазвичай більший розмір пор визначається між нескінченною кількістю дефектів точки випромінювання (розривів) у середньому порі, а потім пори у верхньому та нижньому шарах анізотропно розширюються, що призводить до вищої поверхні поблизу еліпсоїда. Сильне вираження запалення в Inb обумовлено меншою поверхневою енергією порівняно з іншими напівпровідниками A3B5, і знищити вільні простори - внутрішній атом - ще складніше через наявність енергетичного бар'єру. Формування більшої товщини шару при включенні незмінних іонів під час теплових ударів може істотно вплинути на якість InSb-зображень. Наприклад, під час виготовлення p-n переходів із впорскуванням магнію потужністю 200 iV та дозою $5 \cdot 10^{14}$ см⁻² n-InSb, травлення на глибину 0,4 - 0,6 мкм від поверхні імпантату потрібно, щоб

запобігти блокуванню потоку у верхній частині фотографій. [20, 21], це підтверджує кінцеві точки позаклітинної ролі [16-19].

2.2. Тип перетворення механізму активації InSb, який використовується для передачі іонів

Виробництво фотосистеми InSb методом іонного вприскування з використанням, як правило, двох технологічних методів:

- 1) введення неактивного забруднювального іона в поставку типу InSb n-типу, такого як берилій, магній та цинк [2,5, 20-30].];
- 2) додавання донорного забруднюючого іона у формі сірки до континууму типу InSb p-типу [31, 32].

З цією метою використовується якість прилада InSb, з концентрацією основних носіїв заряду 10^{14} - $5 \cdot 10^{15}$ см⁻³ при $T = 77$ К забезпечує високу світлочутливість через велику відстань дифузії ННЗ в основній області фотодіодів. область контакту Збільшення кількості основних носіїв в InSb зменшує площу контакту p-n та збільшує шанси перевантажень, що призводить до великого перекриття. Крім того, підвищення тиску сприяє розмноженню між областями ОЗ, скороченню життя NZ та тривалості інфузії. Застосування N-InSb при тиску менше 1×10^{14} см⁻³ призводить до зменшення ємності форм-фактора та зменшення об'ємного об'єму. Починаючи з 1975 р. Включення іона Берлію у форму InSb є найбільш широко використовуваним методом отримання inSb p-сполук [20]. Якщо значення маси $M = 9$, не повинно бути зайвого пористого шару, який не регенерується в неактивній області 50 іонів, то [[16 - 19]. Їх відносно висока активність при додаванні іонів при кімнатній температурі, що становить майже 100% тепла при $T \cong 350$ ° С, позитивно впливає на селективність іонів берилію [33]. Позиція атомів берилію на вставці кристалів n-InSb досліджена шляхом видалення іонів He + [2]. З цією метою в літальних апаратах (110) та (111) були використані кристалографічні зразки n-InSb. Установку В + + при кімнатній температурі 30 і 100 кЕВ проводили при дозах від $3,10^{14}$ до $1,10^{15}$ см⁻². Для InSb відкладення іонів Ve + становить $E =$

30 кєВ та $4,2 = 4,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ і відпалює при $T = 350^\circ \text{ C}$ протягом 30 хвилин, не дивлячись на кристалографічну площу води, найбільше атоми виробляються одразу після введення і робляться безпосередньо всередині. іndum субодиничний вузол. Зміна типу потоку від р до р помітна лише після опису дефекту типу внеску. При двоступеневому рівні енергії берилію $E = 100 \text{ кєВ}$ при дозі $\Phi = 9,6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, а $E = 30 \text{ кєВ}$ і $\Phi = 4,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, ефективність перевищує 90%. Цьому сприяє велика кількість вакансій, створених під час вставки, висока рухливість дефекту на нерівних поверхнях та менший радіус іонів Ve^+ . Тобто тип безперервності установки модифікується з метою знищення дефектів лічильника та класифікації їх постачальників. Дослідження розподілу берилію в сигналі ICE-0 InSb (див. Табл. 1, 2) для введення іонів при $E = 200 \text{ кєВ}$, $\Phi = 10^{15} \text{ см}^{-2}$ та термоанеральної суспензії при $T = 450^\circ \text{ C}$ описано в [33]. Вкладиші виконувались під вставку (захищеного) шару SiO_2 товщиною $\sim 0 \text{ мкм}$. Інтервенційні зразки негайно переносили на азотний азот і після інкубації при $T = 450^\circ \text{ C}$ протягом 30 хвилин їх негайно видаляли з коріння та охолоджували повітря. Розподіл берилію досліджували за допомогою VIMS. Профіль випробування складався з металевої форми з двома максимумами, один знаходився на відстані $0,2 \text{ мкм}$ від щільної поверхні, з атомом берилію понад $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а другий на клапті при $\sim 0,7 \text{ мкм}$ при натисканні атомів берилію в діапазоні $1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Концентрація атомів берилію становила $\sim 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ та $2 \text{ мкм} - \sim 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ безпосередньо до поверхні вимірювача. У разі термічного стиснення профіль берилію не змінився, за винятком достатньої температури, що могло бути пояснено одержанням берилію через дефект структури, викликаної радіацією. Відсутність перерозподілу берилію унеможливорює розсіювання допоміжного речовини та видалення кордону р-п переходу від дефекту радіації. Наявність другого наконечника біля верху профілю берилію $20,2 \text{ мкм}$ пояснюється їх прикріпленням до першого щільного шару, який характеризується введенням сильного гетероцитарного іона, що містить InSb, щодо атома берилію. Перетворення профілів берилію в n-InSb з електроном $(3-4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ та їх рухливістю при $5 \cdot 10^5 \text{ см}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$ ($T = 77 \text{ K}$) спостерігали імпульс

Фотона відпал [2]. Енергія іона становила 100 кєВ, а доза $\Phi = 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Фотонний відпал проводили при 350°C протягом 60 секунд і 450°C протягом 30 секунд. Джерелом випромінювання були кварцові галогенні лампи, і процес зміцнення Фотона здійснювався в умовах азоту. Дослідження профілю берилію проводили за методом VIMS. На відміну від [2], берилієвий профіль має лише один шар, утворений на площі $\sim 0,2 \text{ мкм}$, коли концентрація атомів берилію в незмінних зразках становить $\sim 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. 10^{18} см^{-3} , а на глибині $0,64 \text{ мкм}$ - 10^{17} см^{-3} . Це наступні тенденції зміни профілів берилію під час фотонного відпалу зразків:

- 1) Максимальна концентрація атома берилію зменшується з $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ у незгорілому зразку до $1,2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, відпалених при 450°C протягом 30 секунд.
- 2) Положення максимального розподілу атомів берилію не змінювалося з глибиною залежно від режиму відпалу фотонів.
- 3) Коли відстань становила $60,6 \text{ мкм}$, концентрація атомів берилію майже не змінилася фотонним відпаленням. На поверхні фотонне відпал при 450°C протягом 30 секунд знижує концентрацію атомів майже вдвічі порівняно з вихідним зразком.

Перетворення профілю берилію після іонної імплантації та фотонного відпалу пояснюється відсутністю верхнього неупорядкованого шару [18], де енергія опромінення іонів берилію вдвічі нижча та інваріантність профілю відпалу фотонів через фіксацію берилію радіаційними дефектами Буде. В діапазоні температур $300-500^\circ \text{C}$ встановлено стехіометрію атомів індію та сурми з 30-секундним фотонним відпалом. Показано, що стехіометрія індію поверхні ін'єкційного шару зберігається при температурі приблизно 400°C , а сурма - до $T = 350^\circ \text{C}$. Отже, імплантація іонів берилію забезпечила два технічні шляхи для перетворення типу провідності в n-InSb: 1) Стійкий термічний відпал поверхневих зразків, захищених при температурі 370°C - аргону та водню 30 хвилин при -380°C в атмосфері з понад 95% складом 2) ІФВ. Подальше поліпшення умов для підтримки ІФВ описано в [5, 22-25, 38-43]. Основні технічні шляхи виготовлення імплантованих InSb фотодіодів

включають:

- 1) Be⁺ іони для створення плоских p⁺-n переходів з 1 ступенем ($E = 30 \text{ кэВ}$, $\Phi = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$) та 2 ступенями ($E_1 = 100 \text{ кэВ}$, $\Phi_1 = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; $E_2 = 40 \text{ кэВ}$, $\Phi_2 = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) Режим.
- 2) Перетворення типу провідності іонно-імплантованого шару в стаціонарний термічний відпал, дифузійну піч, $\text{H} = \text{Ar}$ змішаний потік газу, $T = 375^\circ \text{C}$ протягом 30 хвилин, захисна плівка товщиною 0,2 м SiO₂.
- 3) Захист поверхні анодизованої плівки товщиною 0,05 мкм та анодизованої плівкою SiO_x товщиною 0,5 мкм із двома діелектричними шарами.
- 4) Металізація за допомогою двошарової плівки Cr з товщиною 0,08 мкм та товщиною Au 0,5 мкм.
- 5) Сформуєте захисне кільце навколо чутливої області. Це додатковий короткий перехід p⁺-n.
- 6) Вдосконалення основної технології виготовлення InSb фотодіодів. Це полягало в заміні стійкого термічного відпалу іонної структури імплантації на імпульсне фотоелектричне відпалення.

Таблиця 1. Маркування та параметри об'ємного монокристалічного InSb, виготовленого в СРСР [2].

Марка	Тип	Концентрація носіїв заряду, n , см^{-3} ($T = 77 \text{ K}$)	ρ , Ом·см ($T = 77 \text{ K}$)	μ , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ($T = 77 \text{ K}$)	N_D (см^{-2}), густина дислокацій не більша ніж	Діаметр зливка, мм
ИСД-1	p	$1 \cdot 10^{12} - 5 \cdot 10^{13}$	50–500	$3 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	не реглам.
ИСД-2	p	$3 \cdot 10^{12} - 5 \cdot 10^{13}$	50–300	$4 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	не реглам.
ИСД-3	p	$5 \cdot 10^{12} - 3 \cdot 10^{13}$	50–250	$5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	не реглам.
ИСД-4	p	$5 \cdot 10^{13} - 1 \cdot 10^{15}$	<50	—	$5 \cdot 10^3$	не реглам.
ИСД-5	p	$1 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{18}$	<50	—	$5 \cdot 10^3$	не реглам.
ИСЭ-0	n	$8 \cdot 10^{13} - 2 \cdot 10^{14}$	—	$(7-8) \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^3$	не реглам.
ИСЭ-1	n	$(0.8-2) \cdot 10^{14}$	—	$5 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^3$	50–60
ИСЭ-2	n	$1 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{18}$	—	$2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^3$	не реглам.
ИСЭ-4	n	$5 \cdot 10^{12} - 5 \cdot 10^{18}$	0,1–10	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^3$	не реглам.
ИСЭ-1В	n	$2 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{15}$	—	$6 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^2$	40

Таблиця 2. Легуючі домішки в InSb [53-55].

Домішка	Тип	Енергія іонізації, меВ
Li	<i>n</i>	—
Na	<i>n</i>	—
Cu	<i>p</i>	23
Cu	<i>p</i>	64
Ag	<i>p</i>	20
Ag	<i>p</i>	39
Au	<i>p</i>	66
Au	<i>p</i>	27
Be	<i>p</i>	—
Mg	<i>p</i>	—
Zn	<i>p</i>	8
Cd	<i>p</i>	28
Cd	<i>p</i>	9,8
Si	амфотерна	—
Ge	амфотерна	106
Sn	<i>n</i>	—
S	<i>n</i>	—
Se	<i>n</i>	—
Te	<i>n</i>	—
Mn	<i>p</i>	—
Al	<i>n</i>	40
F	<i>p</i>	—

Примітки. Бренд: ISD-Indium Antimo Hall, ISE-Indium Antimin Electronic. Для марки ISE-1 термін життя дірок становить $5 \cdot 10^{-7}$ секунд або більше, а для марки ISE-2v - $1 \cdot 10^{-6}$ секунд або більше.

2.3. Термічний відпал іонно-імплантованих конструкцій

Знайдіть вплив режиму ІФВ на ефективність відпалу радіаційних дефектів, створених імплантацією іона Be + [24]. Поверхня пластини InSb марки ISE-2с (див. Таблицю 1) була підготовлена шляхом хімічного механічного полірування та хімічного механічного полірування з концентрацією донора приблизно 10^{15} см^{-3} ($T = 77 \text{ K}$) та орієнтацією (100) Це було. Імплантація іонів Be + проводилася за один крок енергією 30 кЕВ та дозою $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Термічний відпал проводили інфрачервоним випромінюванням кварцової галогенної лампи в атмосфері інертного газу з використанням кремнієвого фільтра. Поглинає короткохвильову частину спектру випромінювання лампи та використовує $\lambda \approx 1,1 \text{ мкм}$ випромінювання. Товщина ін'єкційного шару в використовуваному режимі ін'єкції становила близько 0,3 мкм, а середня концентрація атомів берилію в ін'єкційному шарі становила приблизно $2,1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Ефективність конверсії в ін'єкційному шарі незахищеного зразка IFV вивчалася в інтервалі температур 200-390 ° C, за цей час температура відпалу для наступного етапу зросла на 20-40 ° C. Найбільш ефективним перетворенням типу провідності шару є два температурні інтервали $T_1 = 290-330^\circ\text{C}$ і $T_2 = 360-390^\circ\text{C}$. Це пояснюється двома видами дефектів з різною енергією зв'язку. Енергію активації відпалу оцінювали через інтервали T_1 і T_2 , при цьому $E_1 = 2,96 \text{ eV}$ і $E_2 = 6,21 \text{ eV}$ відповідно. Оскільки E_1 відповідає енергії активації руху вакансій InSb, дефекти, відпалені на температурному інтервалі T_1 , - це скупчення вакансій індію, швидкість знищення яких обмежена перенесенням швидкості до відтоку або поверхневого відтоку. Відпал складніших споріднених об'єктів (композитів) точкових дефектів відбувається в діапазоні температур T_2 . Це може включати вакансії індію, що містять проміжні атоми берилію, сурму та інші домішки. Зникнення таких дефектів при відпалі обмежується швидкістю руйнування однолітків. Ми виявили, що найбільш ефективний показник IFV

досягається в двоступеневому режимі. На першій стадії відпалу температура проби становить $300-330^{\circ}\text{C}$ протягом 40-120 секунд. Другий етап настає при температурі $385-400^{\circ}\text{C}$ протягом 10-20 секунд. Ефективність такого двоступеневого ІФВ пояснюється вакантним відпаленням сидінь та відпаленням філій. Провідність перетворення в двоступеневому режимі ІФВ є більш ефективною, ніж у режимі одностадійного відпалу і може досягати майже 90% активації атома берилію. У літературі є суперечливі повідомлення щодо якості InSb p + -n-з'єднань, вироблених методом стаціонарного термічного відпалу та імплантації іонів берилію за допомогою IFV [14]. Висока металургія p + -n переходів, створена під час одномоментної імплантації іонів Be + у пластини з E + 40 кЕВ та $\Phi = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ до 10^{14} см^{-3} та дефекти випромінювання ІФВ Було підтверджено, що двоступеневий постійний нагрівання якості відпалюється [23]. Метод EVIS був використаний для дослідження якості p + -n переходів. При приготуванні p + -n переходів на плитах InSb з концентрацією електронів 2, $10^{13}-3, 10^{14} \text{ см}^{-3}$, в перехідній основі в тій же дозі під час фотонного відпалу та E = 40 кЕВ одномоментної імплантації іонів Дифузійна довжина отворів коливається від 8 до 10 мкм. Іншими словами, він практично не залежить від концентрації основних носіїв заряду в основі. При стаціонарному термічному відпалі довжина дифузії нерівноважних отворів у базовому переході p + -n така сама, як вихідний матеріал [14]. У випадку IFV довжина дифузії отвору на дні переходу p + -n зазвичай коротша, ніж у вихідного матеріалу, що пояснюється відсутністю відпалу на дні переходу p + -n для радіаційних дефектів. Таким чином, автори [14], очевидно, віддають перевагу стійкому термічному відпалу InSb p + -n переходів, імплантованих іонами берилію, а не імпульсних фотонів для виготовлення матричних фотодіодних структур на основі антимоніду індію в форматі 320x256. Вплив іонного режиму імплантації Be⁺ E₁ = 100 кЕВ, $\Phi_1 = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ та E₂ = 40 кЕВ, $\Phi_2 = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ у n-InSb основним двоступеневим методом на темний струм невеликого фоточутливого елемента 50x50 мкм із 128 елементами InSb порівняно з одностадійною енергією Be + 40 кЕВ та дозою $10 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ Фотодіодна лінія [5].

Пасивні та захисні покриття були однаковими. Пасиваційний шар основного оксиду товщиною 0,05 мкм утворювався на електроліті з постійним струмом на основі Na₂S, а захисний шар наносили шляхом розпилення SiO_x при температурі зразка. 70 ~ 80 ° С при товщині 0,5 мкм. . Контактну металізацію проводили розпиленням структури Cr / Au. Рекомендується оптимічно контролювати важливі параметри InSb на всіх стадіях генерації підкладки та р-п кон'югації [22]. Детальне вивчення впливу стаціонарного термічного відпалу на електрофізичні властивості імплантованих іонів Be + в області джерела InSb [21]. Еволюція зміни параметрів на неупорядкованих поверхнях InSb, імплантованих іонами Be +, з E = 200 кЕВ у діапазоні доз 10¹⁴-10¹⁵ см⁻², проводилася при температурі 100–400 ° С протягом 30 хвилин. Високоопірний субстрат р-InSb з концентрацією отвору 10¹²-10¹³ см⁻³ (T = 77 K). Субстрат р-InSb, який не легований домішками германію, був обраний для експерименту, оскільки під час термічного відпалу спостерігалася конверсія типу провідності через поведінку амфотерних домішок. До відпалу зразок захищали шаром SiO₂. Методом Ван дер Пау вимірювали поверхневу концентрацію ps + при T = 77 K. Термічний відпал при T = 350 ° С, поверхнева концентрація відповідає активації легуючих речовин, близьких до 100%, T ≅ 400 ° С, поверхневому забрудненню через неконтрольовані домішки акцепторного типу, такі як мідь. Спостерігалось підвищення провідності. Хоча раніше було досліджено вплив стаціонарного термічного відпалу на перетворення типу електропровідності n-InSb на спеціально захищену поверхню, ефект перетворення типу електропровідності пов'язаний з наявністю тонкого мідного шару n-InSb утвореного з кварцової ампули шляхом термічного відпалу. З метою ефективного усунення радіаційних дефектів та активації імплантованих домішок, стаціонарний термічний відпал зазвичай проводять на іонно-імплантованому зразку із захисним шаром SiO₂, тому вплив відпалу на непроменеві характеристики Виникає питання щодо InS. Його значення полягає у визначенні глибини перетворення вихідних параметрів підкладки: концентрації та рухливості основних носіїв заряду, можливих змін типу провідності та тривалості життя NHS. Значна зміна цих параметрів може

спричинити надлишковий струм у $p + -n$ -переході, зменшити чутливість струму, підвищити рівень шуму та властивості та зменшити визначувану потужність фотодіоду. Для дослідження цього ефекту була використана структура MOS InSb / SiO₂ [2], що дозволило встановити: У діапазоні температур відпалу 200-250 ° С великі зміни параметрів структури МДН відбуваються в умовах вакууму ($\sim 10^{-4}$ Па), і це руйнівне з підвищенням температури відпалу вище 300 ° С, Це пояснювалося зміною властивостей поверхневого шару через втрату сурми. У цій області під час процесу термічного відпалу. Для незахищених поверхонь цей факт було доведено дослідженнями мас-спектрометрії та впливом (дифузією) неконтрольованих домішок на поверхні під час процесу термічного відпалу. Аналогічна зміна спостерігалася в структурі, яка термічно відпалювалася в атмосфері інертного газу (азоту, аргону), але на 50-100 ° порівняно з вакуумним відпалом, описаним пригніченням атмосфери сурми. Сурма з поверхні при високій температурі С. Для термічно відпалених поверхневих кровотеч до 60,6 мкм властивості переробленої структури MDN такі ж, як у вихідній поверхні InSb, що не піддається термічній обробці, що вказує на стабільність параметрів сипучого матеріалу. . Виходячи з цих результатів, оптимальні умови для стаціонарного термічного відпалу іонно-імплантованого зразка відпалюють в інтервалі температур 300–375 ° С на захищеній поверхні SiO₂, виконаній в атмосфері аргону, і глибині поверхневого шару Травлення до 0,6 м. $-p + -n$ Необхідна операція для забезпечення якості з'єднання. Параметри кристалічної решітки InSb не узгоджуються з параметрами близького порядку аморфного SiO₂, і існує велика невідповідність коефіцієнта теплового розширення, тому в гетеропереході InSb / SiO₂ існує велике механічне напруження [2]. При температурі термічного відпалу від –250 до 300 ° С відбувається релаксація внаслідок утворення дислокацій, що не відповідають вимогам, змінюючи властивості області поверхні n -InSb. Якщо припустити, що дислокації утворюють донорські центри, можна очікувати утворення поверхневого шару з більш високою щільністю електронів, ніж об'ємна, тобто утворення структури a -SiO₂ / $n + -n$ -InSb. Можливі пояснення результатів

відпалу: зі збільшенням температури відпалу все більш летючі атоми (сурми) відокремлюються на гетеромежі, створюючи вакансії біля поверхні. Проміжні атоми індію, що займають атоми сурми, утворюють антиструктурні дефекти акцепторного типу. При температурі відпалу вище 300°C антиструктурні дефекти InSb разом із вакансіями індію та активованими домішками берилію утворюють суцільний шар типу p на імплантованому InSb. Донорський характер дислокацій та їх формування в InSb підтверджуються такими фактами. Коли іони $\text{Be} + \text{i Mg} +$ імплантуються в n-InSb, тип провідності не перетворюється, оскільки дефекти випромінювання, викликані імплантацією, мають донорські властивості. У невпорядкованому шарі електронна мікроскопія виявила значну концентрацію циклічних дислокацій, аналогічну донорній дислокаційній мережі [16-19]. Провідний n + шар утворювався шляхом опромінення наносекундних лазерних імпульсів на поверхні p-InSb без додаткового термічного відпалу. Аналогічний ефект спостерігався, коли поверхня матеріалу високоомічного детектування p-CdZnTe опромінювалась наносекундними лазерними імпульсами. Вивчення механізму проходження струму при низьких температурах виявило природу дислокацій. Крім того, опромінення поверхні p-InSb протонами [2] призводить до перетворення типу провідності, що супроводжується утворенням n + -p переходу, і не зникає навіть при нагріванні до 150°C .

2.4. Вдосконалення базової технології

В даний час досліджується вплив різних технологічних операцій, які виробляють імплантовані Іоном p + -n переходи InSb на основні технічні параметри та оптимізацію цих операцій порівняно з основними операціями [5, 22-25]. Удосконалений цільовий параметр для досягнення цих варіацій у фоновому режимі з обмеженим режимом (режим BLIP) [5] - це щільність струму постійного струму в діапазоні напруги зміщення від 0,01 до 1,0 В при $T = 77\text{ K}$. Вимірювання ВАХ проводили на рідкому азоті без ІЧ-випромінювання на зразку.

- 1) Режими імплантації та відпалу для поліпшення кордонів p-n переходу.
- 2) Вибір режиму зварювання необхідного з'єднання із золотим провідником

діаметром 35 мкм методом термічного стиснення, щоб уникнути внесення дефектів в активну область переходу.

3) Оптимізація відстань положення захисного кільця до краю фоточутливої колодки фотодіоду.

Для вирішення цих проблем було проведено три серії експериментів. У першій серії це було 30 мкм при збереженні основних технологічних елементів, таких як відстань від краю світлочутливої колодки до краю захисного кільця. Пасивація та захист переходу досягаються шляхом формування пасиваційної плівки товщиною 0,05 мкм за допомогою електроліту на основі Na_2S та розпиленням захисного шару термічним вакуумним методом відповідно. Це було виконано. SiO_x товщиною 0,5 мкм. Експеримент порівнює VAR для чотирьох технічних схем, які змінюють умови відпалу, утворюючи p + -n переходи.

1) $E_1 = 100$ кєВ, основна схема, що включає двоступеневу імплантацію іонів Be $E_1 = 100$ кєВ, $\Phi_1 = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (перша стадія) та $E_2 = 40$ кєВ, $\Phi_2 = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (друга стадія)) 3 подальшим постійним термічним відпалом зразка захисним шаром SiO_2 при температурі $T = 375$ °C протягом 30 хвилин; $\text{Ar} + \text{H}_2$ газового змішаного потоку газу при $T = 280$ °C

2) Основна одноетапна імплантація іонів Be з $E_1 = 100$ кєВ, $\Phi_1 = 10^{14} \text{ см}^{-2}$, з подальшим ІЧЧ із застосуванням ІЧ-випромінювання з кварцової галогенної лампи у вакуумному стані при $T = 375$ °C протягом 30 секунд .

3) Режим відпалу IF V також покращується при одностадійній імплантації іонів Be з $E_1 = 100$ кєВ та $\Phi_1 = 10^{14} \text{ см}^{-2}$ для зразка, поверхня якого не захищена потоком $T = 280$ °C $\text{Ar} + \text{H}_2$ Було 15 хвилин;

4) Покращена одностадійної імплантації InSb InSb p + -n переходу та подальший відпал ІФВ на незахищених поверхневих зразках протягом 30 хвилин при $T = 375$ °C.

Перша серія експериментів, спрямованих на уточнення режиму введення зразків та відпалу, показала, що максимальний зворотний темний струм формувався при виконанні умов четвертої блок-схеми. При зворотному зміщенні

0,1 В щільність струму $J_4 = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ А / см}^2$ зростає. Нижче наведений індекс показує технічну схему відпалу. Для двоступеневої основної схеми, яка виробляє р + -n перехід $J_1 = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ А / см}^2$ при однаковій напрузі, найкращі результати були отримані у другому та третьому технічних схемах, що створюють перехід . $J_3 = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ А / см}^2$ при $U = -1,1 \text{ В}$. Друга серія експериментів спрямована на оптимізацію технічного маршруту зварювання золотих сполучних провідників, що з'єднують колодки в чутливій області площини р + -. N-перехід між накладкою корпусу фотодіоду та робочою підсилювальною колодкою. Спосіб підключення - низьке механічне навантаження ("м'яке" з'єднання) золотого провідника діаметром 35 мкм і термічне стиснення, яке може виконуватися як з високим струмом, так і з високим механічним навантаженням ("жорстке" з'єднання) через електрод). Досліджено вплив трьох ланцюгів з'єднання провідника.

1) Контакт корпусу ("жорстке тіло") з контактною областю ("м'якою") чутливої області планарного р + -n переходу. Вихід із фотодіодної основи ("м'який режим") з корпусом фотодіоду (жорсткий режим),

2) накладка у чутливій області плоского переходу р + -n з прокладкою підсилювача ("середній") ("Soft" режим) "Підключений режим";

3) Накладка у чутливій області планарного р + -n переходу ("Soft" режим) з накладкою корпусу фотодіода (режим "Hard").

Вивчення впливу фотодіодів Схема з'єднання рівня темної щільності струму при $U = -1,1 \text{ В}$ має найнижчу щільність зворотного струму в ланцюзі технологічного з'єднання №1, $J_1 = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ А / см}^2$ та максимальну Чи є технічна схема з'єднання за схемою №3 $J_3 = 3,2 \cdot 10^{-7} \text{ А / см}^2$, а коли відбувається вихід, щільність входу для фотодіоду $J = (1,2-1,3) \cdot 10^{-7} \text{ А / см}^2$. Таким чином, друга серія експериментів показала можливість використання першої схеми підключення кристала фотодіоду до контактної колодки корпусу. Крім того, досліджено вплив структурного (стаціонарного теплового або фотонного) відпалу на якість переходу р + -n. Щоб знизити рівень шуму невеликих розмірів р + -n стиків, ми пропонуємо використовувати захисні кільця. Захисне кільце - це короткозамкнений р + -n

перехід, виконаний процесом імплантації одноіонним, але приблизно рівний довжині дифузії діода NHS (Холла), розміщеного на відстані ($\sim 15\text{--}20$ мкм). Наявність захисного кільця слугує основною функцією стандартизації (вирівнювання) довжини дифузії NHS навколо платформи світлочутливого діода. Це знижує рівень вибухонебезпечного шуму і підвищує основний пороговий параметр виявлення. Оптимальним значенням щільності струму при зворотному зміщенні $U = -0,1$ В було $J = 2,7 \cdot 10^{-7}$ А / см² ($T = 77$ К) для фотодіоду, виготовленого за третьою технологічною схемою з використанням IFV . Це на порядок вище межі темного струму ($J = 1,2 \cdot 10^{-6}$ А / см²) для фотодіодів InSb, які можуть виявляти ІЧ-випромінювання в режимі BLIP. Зворотний коефіцієнт CVC такого діода апроксимується залежністю від ступеня $J \sim U^m$, де $m \cong 0.67$ - показник, прямий CVC - залежність $J = J_0 \exp(eU / \beta kT)$, а $\beta \cong 1.5$ - неповний коефіцієнт. Значення m та β чітко показують реалізацію темного струму при переходах, виконаних згідно третьої технічної схеми. У другій вдосконаленій блок-схемі, що замінює IFV стаціонарним відпалом при 280°C , щільність струму кращого фотодіоду при $U = -0,2$ В становить $J = 6,8 \cdot 10^{-7}$ А / см², що підлягає умові Відповідна операція в режимі BLIP. Значення $m = 0,5$ та $\beta \approx 1,5$ означають реалізацію переходу темного струму $p + -n$. Це складається з майже рівних компонентів генерації-рекомбінації та дифузії в порівнянні з переходом $p + -n$, виконаним згідно третьої технічної схеми. Ці параметри (m і β) дещо кращі, що свідчить про високу якість створеного переходу. На основі експериментів, проведених для вдосконалення основної технології отримання низькочастотних фотодіодів InSb, було запропоновано наступне.

1) Імплантація іонів Be^+ з енергією 40 кЕВ та IFV $T = 1014$ см⁻² дози, без відпалу покриття SiO_2 , 380°C за 10-30 секунд або $T = 280^\circ \text{C}$ протягом 15 хвилин стаціонарного відпалу .

2) Зменшити відстань від краю захисного кільця до краю світлочутливої колодки до 30-10 мкм.

3) Збільшити товщину підконтактного діелектричного шару SiO_2 до

товщини ~ 1 мкм.

4) Реалізація з'єднання теплового стиску між корпусом та робочими контактами підсилювача та золотими провідниками за схемою: світлочутливій області та контактні колодки підсилювача - "м'який" режим термічного стиску, а корпус фотодіоду контактного майданчика - "жорсткий". Одночасно вони спочатку виконували операцію заземлення, потім приєднували провідники до контактів корпусу, а потім прикріплювали до контактних колодок у фоточутливій області.

2.5. Обробка поверхні підкладок InSb

2.5.1. Абразивна обробка поверхні підкладок

Для виготовлення фотодіодів InSb на основі сипучих матеріалів використовують пластини, вирізані з злитків, і їх поверхні повинні бути підготовлені для формування приладових структур, таких як рп-переходи, які є чутливими елементами фотодіодів. . Процес обробки поверхні плити зазвичай заснований на раніше розробленому технічному шляху обробки поверхні Si, Ge або GaAs. Ці стандартні технічні маршрути включають механічне (полірування) різання злитків на плити, точне багатоступеневе механічне шліфування та полірування супертвердими матеріалами. Пошкоджені шари, що утворюються на поверхні пластини після механічної обробки, видаляються методами хімічного механічного полірування та хімічного динамічного полірування [2]. Одним з головних завдань серії полірування та хімічної обробки поверхні напівпровідникової пластини є забезпечення параметрів електрофізики (концентрація та рухливість основних носіїв заряду) та фотоелектрики за обсягом (нерівноважний час носія заряду) Тобто площа поверхні та поверхня основного матеріалу є постійними. Термін підкладка зазвичай використовується для напівпровідникових матеріальних плит і підходить для прямого використання на стадії виготовлення конструкцій обладнання на додаток до хімічної обробки. Використання стандартних (кремнієвих) поверхневих обробок пластин з вузьким зазором A2B6, таких як кадмій-ртуть-телур або сполуки A3B5 (InAs, InSb та їх

тверді розчини), які мають менші механічні властивості, ніж Si або Ge, визначають вихід . 20% відповідних фотодіодів InSb [2]. Проблема обробки поверхні субстратів InSb ще більше ускладнюється тим, що зона механічного напруження виникає внаслідок особливостей формування дефектів під час полірування та низьких механічних властивостей InSb з площею поверхні менше 50 мкм [2] . Подальше утворення р-n переходів знімає ці напруги і створює систему точкових та лінійних (дислокаційних) дефектів. Зміни структурних властивостей вихідного матеріалу поблизу поверхні впливають на час життя нерівноважних носіїв заряду. Зміни параметрів підкладки відбуваються також під час підготовчих інженерних операцій з виготовлення чутливих елементів стиків р-n. Оскільки глибина іонно-імплантованого рn-переходу становить $\leq 1\mu\text{m}$, слід зазначити, що зміни електрофізичних та фотоелектричних параметрів поблизу поверхні підкладки сильно впливають на експлуатаційні характеристики рn-переходу [1, 4, 2], скорочуючи дифузійну довжину ТНВ та аміаку [2, 14]. Проблема залишається зменшити товщину базової області InSb до 15-20 мкм. У цій області фотодіодний масив вже сформований з протилежного боку, не створюючи дефектів в активній області. Товщина основи обмежена довжиною дифузії NHS. Це від 15 до 20 мкм для якості пристрою n-InSb [14, 23]. Надалі така структура з матрицею фотодіодів та тонкою основою буде досягнута колоною індію на спеціальній гібридній колонці приладу за допомогою методу «фліп-чіп» зчитування сигналів від фотодіоду до кремнієвого чіпа. Його можна прикріпити. У такій гібридній матриці фокусування освітлення виконується тонкою базовою площею. Процес обробки поверхні пластин напівпровідникового матеріалу вирішує такі завдання: 1) Створення геометрично ідеальної поверхні підкладки із специфічною кристалічною орієнтацією. Це, як правило, не має високого ступеня блиску та площини паралелізму. Поверхня пластини. Це викликано вимогами до фотолітографії. 2) відсутність приповерхневої ділянки неупорядкованого або механічно напруженого шару, що виникає під час полірування поверхні з дефектами максимальної щільності; 3) генерування поверхні стехіометричного

складу. Це сприяє відсутності потенційного бар'єру на гетеромежі власного субстрату оксид-InSb. 4) Не має поверхневих забруднень, спричинених адсорбцією продуктів хімічної реакції та оксидної плівки. Якість обробки поверхні контролюється такими параметрами:

1) Шорсткість RZ (сукупність мікрорівномірності поверхні на певній довжині основи, що утворює мікро рельєф на поверхні), це $RZ \leq 0,05$ мкм на робочій поверхні підкладки, не працює $\leq 0,1$ мкм;

2) Не існує механічно порушених шарів, які контролюються інваріантністю швидкості травлення до половини ширини кривої коливання відбиття лінії дифракції або глибини підкладки.

3) Плоскості діаметром не більше ≤ 2 мкм (або максимальний розмір дошки).

4) Точність кристалічної орієнтації робочої поверхні підкладки, в межах від ± 1 до $2^\circ (\pm 30')$.

5) Щільність дислокації на поверхні підкладки. Значення гучності не повинно перевищувати.

6) Поверхнева стехіометрія.

Внизу ламаного шару розташований локальний шар на поверхні пластини. Там структурні та фізичні параметри відрізняються від об'ємних параметрів пластини. Коли монокристалічний злиток вирізається на пластину за допомогою алмазного диска або струни з абразивом, в результаті взаємодії між більш твердими абразивними частинками та напівпровідниковим матеріалом з'являється руйнівний шар. Ми пропонуємо, що шар відмови складається з чотирьох умовних зон. 1) полегшення полікристалічної зони. Її товщина поширюється на неоднакову середню висоту від 0,3 до 0,5 і характеризується тріщинами, виступами, задирами та відступами. 2) зона дроблення з 3 - 6-кратною довжиною рельєфного полікристалу. У зоні перелому зосереджені тріщини, виходи дислокації, петлі дислокації, дислокаційні сітки, точкові дефекти та пов'язані з ними компоненти. 3) область матеріалу, що зазнає механічного напруження, в основному зосереджена, і в результаті послаблення цих напружень, дислокацій та їх сіток, спричинених

механічним напруженням та зонами дислокації - верхня зона руйнування; Зона напруження в 2-3 рази довша, ніж зона дроблення. 4) Зона з високою щільністю вивихів. Його довжина майже втричі перевищує зону механічного напруження. У зоні дислокації зосереджені дислокації та їх утворення в основному за рахунок розслаблення пружної деформації верхньої зони. Різниця між пошкодженим шаром, викликаним різанням та шліфуванням, полягає в локалізації дефекту після різання абразивним (алмазним) диском або ниткою, покритою абразивом: дефект влаштований у вигляді паралельних ліній з механічних причин. Більше контакту між абразивними та ріжучими інструментами. При поліруванні всі дефекти розподіляються рівномірно по поверхні тарілки. При механічному поліруванні структура неупорядкованого шару дещо відрізняється і складається з трьох зон: аморфного рельєфу, тріщини аморфної зони та зони пружної деформації високої щільності. В аморфній зоні рельєфу поверхневі нерівності сконцентровані і значно менші, ніж під час полірування. Ця зона - це аморфна структура, а не полікристалічна структура. Середні дані глибини зруйнованого шару InSb відповідно до технічних умов обробки наведені в таблиці. 3. Дослідження структурно порушених шарів та їх товщини потрібно проводити різними способами. Найбільш корисними є рентгенографічні та рентгенівські методи [2]. Корисну інформацію про вплив дефектів неупорядкованого шару на час життя NHS та профіль неупорядкованих шарів у багатошаровому травленні можна отримати з вимірювань спектрів імпульсної фотопровідності, світлочутливості та магнітооптичних ефектів, а також спектрів фотолюмінесценції. Можна [2]. Вимірювання вигину підкладки руйнівним шаром, мікротвердістю, спектром відбиття [2] встановлює глибину рельєфу полікристалічного та механічного напруження при травленні шару підкладки та кількісне та якісне визначення поверхневого забруднення. Можна контролювати. Між операціями та стадіями, що виконуються за допомогою шнекової спектроскопії та VIMS. Методи швидкості травлення та електронної мікроскопії розкривають глибину бар'єрного шару та локалізовані в ньому дефекти під час різних поверхневих обробок [2]. Поверхня

підкладки InSb (111) В була оброблена абразивними зернами вільного з'єднання діаметром близько 14 мкм, а також досліджено вплив алмазного полірування та хімічного механічного полірування на AFM-1 та AFM-2. В основі цієї технології лежить те, що швидкість травлення матеріалу залежить від умов. Після кожного травлення визначали товщину шару травлення та швидкість травлення, будували залежність $V_{tr} = f(d)$. Де V_{tr} - швидкість травлення, а d - товщина шару травлення. За глибину зруйнованого шару автор отримав товщину травленого шару, спостерігав зміну швидкості травлення, дефектів не спостерігалось. Використовуючи той самий зразок, стан дефектів шару розломів та розподіл дефектів по глибині досліджували за допомогою передавального електронного мікроскопа за допомогою мікроскопа JEM-150. З цією метою ми підготували тонкий зразок з парафіновим захистом збоку зі зламаним шаром. Для поверхонь, оброблених пастою AFM-1, залежність $V_{tr} = f(d)$ була V-образною. Спочатку швидкість травлення становила приблизно 20 мкм / хв і була постійною до 10 мкм травленого шару. В інтервалі 10-20 мкм V_{tr} зменшився до приблизно 6 мкм / хв на глибині близько 25 мкм. Подальше травлення поверхні 20-40 мкм на підкладці V_{tr} збільшували до ± 18 мкм / хв. Під час наступного травлення швидкість травлення не змінилася на глибину 65 мкм. Висока швидкість травлення на початковій ділянці пояснювалася наявністю сильно порушеного шару у верхній області субстрату з концентрацією дислокації від 10^{10} до 10^{11} см⁻². Найвища щільність дислокації в поверхневій абразивній та пластичній деформації матеріалу - глибина 10 м, що спричиняє високу засвоюваність. Зниження V_{tr} на глибину до 25 мкм пояснюється великою зміною структури порушеного шару. В основному видно тріщини, оточені дислокаціями та їх скупчення, концентрація яких зменшується із глибиною травленого шару, а швидкість травлення шару зменшується. На глибині 25 мкм тріщини зникають, але вони відповідають за механічні навантаження, локалізовані в більш глибоких шарах, тому швидкість травлення збільшується до ~ 18 мкм / хв після стабілізації швидкості травлення до мінімуму 40 мкм. Подальша кровотеча до 60 мкм не змінила швидкість травлення, що вказувало на значно

більш глибоку область пружної деформації, де електронна мікроскопія пропускання не виявляла наявності вивихів. Тому автор експериментально виявив наявність принаймні трьох зон з різними фізико-механічними властивостями під час механічного полірування алмазної пасти АСМ-1: зони пластичної деформації матеріалу досить рівномірно зосереджені Велика кількість вивихів та їх скупчення; тріщина, що містить скупчення дислокацій, що оточують тріщину, щільність якої зменшується з глибиною. Зона пружної деформації. Зокрема, полірування поверхні InSb підкреслює, що алмазна паста з середнім розміром частинок ~ 1 мкм, яку необхідно протравити під час виготовлення робочої поверхні, призвела до утворення шару ~ 60 мкм. Результати дослідження неупорядкованого шару, спричиненого хімічним механічним поліруванням, аналогічні результатам дослідження механічної обробки поверхонь матеріалів.

Таблиця 3. Параметри порушеного шару в залежності від способу обробки поверхні InSb [2].

Вид обробки	Умови	Глибина порушеного шару поверхні (111)В, мкм			
		InSb	InAs	GaAs	Si
Розрізання зливка алмазним диском	Зернистість абразиву 60/53, швидкість обертання $\omega = 4 \cdot 10^3 \text{ хв}^{-1}$	100–150	50–70	34–42	20–30
Шліфування на	Вільний абразив суспензії порошку				

скляному шліфу- вальнику	M10	28–32	20–25	25	11–15
	M5	20–26	12–15	10	7–9
Шліфування на верстаті	Зв'язаний абразив АСМ-28	20–24	17–20	17–19	14–16
Полірування на верстаті	Алмазна паста АСМ-3	25–30	10–40	11–13	6–9
	АСМ-1	17–20	7–11	8–9	5–6
	АСМ-0,5	15–17	4–6	5–6	1–2
Хіміко- механічне полірування	Суспензія аеросилу SiO_2 (зерно 0,04–0,3 мкм) — Суспензія ZrO_2 (зерно 0,1 0,2 мкм) Суспензія $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (зерно 0,05–1,0 мкм)	10–15 — 10 12 —	2–3 — —	2–3 1 —	1–1,5 — —

Таблиця 4. Глибина порушеного шару InSb [2].

Спосіб обробки	Глибина порушеного шару, мкм
Шліфування порошком КЗМ-14	58
Шліфування зв'язаним абразивом	39
Механічне полірування алмазною пастою АСМ-2	37
Механічне полірування алмазною	35

пастою АСМ-1	
Хіміко-механічне полірування	14

Вище наведене значення глибини ураженого шару залежно від способу обробки поверхні (табл. 4) [2]. Склад полірувального травлення, що виконує травний шар InSb (111) В (об'ємний відсоток): фтороводородна кислота 40% -2-4, винна кислота 20% -54-60 та перекис водню 30% -38-42. HNO_3 СР-4 полірувальний травник: $\text{HF} : \text{CH}_3\text{COOH} = 5 : 3 : 3$ Склад InSb має значну швидкість полірування, що унеможливорює фіксацію появи тонкої фольги InSb, придатної для структурного дослідження електронами пропускання. Було показано, що є мікроскопічним. Крім того, на поверхні InSb після травлення з'являється «апельсинова шкірка» або великий мікрорельєф. Це перешкоджає інтерпретації дифракційної картини і унеможливорює точний аналіз експериментальних результатів проби електронного променя. Досліджується. Для підвищення якості поверхневої обробки тонких зразків в розчин вводили винну кислоту та перекис водню. Це забезпечило стабільність та надійність отриманих результатів. Помаранчевого рельєфного мікрорельєфу на поверхні зразка InSb (111) В не було. Гладка поверхня дзеркала пов'язана з розгладжуючими властивостями винної кислоти. Травлення поверхні (111) А спричиняє селективне травлення через наявність дислокацій, тому травлення можна використовувати для ідентифікації полярних сторін (111) А та (111) В InSb.

2.5.2. Неполірувальний спосіб підготовки субстрату

Пластина InSb для створення рп-переходів, подібних до оброблення кремнієвих пластин, виходячи з особливостей утворення дефектів в процесі полірування обробки поверхні підкладки (механічне різання, шліфування, полірування) та низькоміцних властивостей InSb. За допомогою обробки поверхні та їх використання забезпечуються електрофізичні параметри того ж технічного обладнання, характерні для злитків матеріалів [2]. За наявності механічної напруги

в зоні поверхні InSb довготривалі дефекти (дислокації), як правило, породжуються процесом термічного циклу, що є нормальним режимом охолодженого фотодіоду. Дислокації викликають зміни вихідних параметрів фотодіоду, тобто погіршення. Особливу небезпеку становить вплив дальніх впливів, що спричиняють зони механічного напруження в дефектах росту на підкладках InSb під час обробки [2]. Використовуючи іонів масою до 14, малі дози $\leq 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ та енергію іонів менше 50 кЕВ значно зменшує явище коливання InSb, зменшуючи рівень механічного напруження та щільність дефектів у часі. Можна Термічна обробка іонно-легованої структури. Для дослідження впливу методів обробки поверхні на підкладки InSb для імплантації берилію або магнію іонами було впроваджено два шляхи виготовлення. Одне було вирізати алмазним диском пластину товщиною 0,8 мм із злитка. Потім поверхневу обробку проводили за допомогою звичайного полірування, полірування алмазною пастою, хімічного травлення ХМП або хімічного травлення або хімічного механічного полірування. Інший - це неpolірований маршрут, який створює поверхню InSb субстратів. Єдиною операцією полірування було вирізання алмазного диска товщиною 1,5 мм з подальшим глибоким хімічним механічним травленням з обох сторін видаленням шару товщиною 150-200 мкм. Наступне завдання - хімічне механічне (неполіроване) полірування з видаленням шару 25-30 мкм. Обробка поверхні виконується ХДП з використанням полірувального травлення, виготовленого на основі перекису водню, фтороводородної кислоти, винної кислоти [60, 61], з видаленням шару ~ 20 мкм з кожної сторони пластини Це було. Імплантація іонів Be + або Mg ++ проводилася шляхом охолодження субстрату InSb до рідкого азоту або при кімнатній температурі. Енергія іонів змінювалася в межах $E = 40-80 \text{ кЕВ}$, а доза змінювалася в межах $\Phi = 9,6 \cdot 10^{12}-1,9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Порошок InSb. З метою з'ясування механізму утворення дефектів на полірувальному шляху для виготовлення підкладки InSb, імпантованих іонами Mg + з $E = 80 \text{ кЕВ}$ та $\Phi = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ при 77 К, травлення ступінь на глибину 80 мкм. Я це створив. Згодом утворюються анодний оксид товщиною 0,1 мкм та алюмінієва накладка вакуумним

покриттям діаметром 0,5 мм. Структурований ВФХ МДН вимірювали на частоті 1 МГц як на етапі опроміненого зразка, так і на опроміненому субстраті, згідно з методом знаходження центрального параметра, описаного в [49]. Після термічного відпалу виявляється глибокий рівень походження випромінювання на відстані близько 3,5 мкм від поверхні. Для субстратів, поверхні яких були підготовлені за допомогою полірувальних операцій звичайним маршрутом, глибинний рівень походження випромінювання знаходиться на глибині 8,5 мкм. Перехід $p + -n$, викликаний імплантацією поверхні InSb при кімнатній температурі, виявився гіршим, ніж для охолодженої мішені до температури азоту (InSb). Такого висновку було досягнуто при вимірюванні напруги пробою 3-5 В та -1 В при цільових температурах 77 К та 300 К відповідно. Неідеальний коефіцієнт ВАХ переходів від характерного значення $\beta = 1,4$ діода, сформованого при цільовій температурі 77 К, також значно нижчий за $\beta = 1,7$ діода при цільовій температурі 300 К. Я поясню цю різницю. Збільшуючи концентрацію глибокого рівня ОПЗ $p + -n$, досягнутого іонною імплантацією при 300 К. Концентрація електронів результат дослідження життя ННЗ на підкладці $n - \text{InSb}$ з $n = (1,8-2,0) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ при $T = 77 \text{ К}$ і різні технологічні маршрути його виготовлення: традиційні, які використовують абразиви в процесі планування поверхні та безабразивний, коли абразивний матеріал використовується лише при різанні пластини зі злитка. Час життя ННЗ визначали по послабленню кривої фотопровідності, збудженої лазерним наносекундним імпульсом $\lambda = 0,8 \text{ мкм}$. При звичайному поліруванні та плануванні поверхні пластини після CMP, час життя NNZ становив $\tau = 0,37 \text{ мкс}$, після HDP-0,22 мкс. Тобто, завершальна операція не поліпшила значення τ після обробки пластини CMP. При вирівнюванні поверхні пластини незаземленим контуром термін служби після лікування CFC становить 0,51 мкс, після остаточного HDP до 0,42 мкс. Це майже вдвічі більше, ніж звичайні методи планування. Неполірований шлях підготовки субстрату InSb є основою для здійснення переходів імплантації іонів високої чутливості до струму. Зауважимо, що час життя ННЗ обернено пропорційний концентрації дефектів у приповерхневій області, дослідженій на

глибині $d = 1 / \alpha$. Де α - коефіцієнт поглинання лазера. Якщо довжина хвилі при кімнатній температурі дорівнює 0,8 мкм $\alpha \approx 2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ [1], глибина інформації становить $d \approx 0,5 \text{ мкм}$. Іншими словами, вимірюючи τ за допомогою різних технічних маршрутів, ви можете контролювати кожну операцію маршруту і проводити оптимізацію. У таблиці. На малюнку 5 показані параметри форми сигналу InSb фотодіоду при $T = 77 \text{ K}$, створені на основі кристалічної орієнтації (100) підкладки n-InSb в різних технологічних режимах. Обробку підкладки проводили лише на незашліфованому маршруті. Зауважимо, що технічна операція виготовлення імплантованого іоном діода істотно відрізняється від аналогічної роботи основної технології. Тобто, щодо енергії імплантації, відсутності захисного (інкапсуляційного) шару SiO₂, методу стаціонарного відпалу та енергії імплантації цільової температури енергія імплантації іонів $\text{Ve} +$ нижча від стандартного значення іонів $\text{Mg} + 100\text{-}200 \text{ кЕВ}$ (Значення за замовчуванням вище 30-40 кЕВ). Параметри форми прямої хвилі фотодіоду, що утворюється методом дифузії, є оптимальними - в основному реалізується дифузійний струм. Інший метод якості виготовлення - імплантація іонів $\text{Ve} +$. Найгірші значення параметрів J_0 і R_0A знаходяться в діодах, створених імплантацією іонів $\text{Mg} +$ при цільовій температурі 300 K. Аналогічні висновки можна зробити для поточного J_1 . Темні діоди, які відповідають критеріям режиму BLIP, можна досягти, виготовивши дифузійні діоди. Це стосується також діодів, отриманих при імплантації берилію. Однак велике значення m для зворотного напруги в діапазоні напруги зміщення 0,1-1,0 В чітко вказує на реалізацію режиму перфорації і не стосується початкової концентрації електронів підкладки n-InSb. Для діодної дифузії зворотні струми зміщення, створені дифузією Cd, зворотний KBK повинен насичуватися в досліджуваному діапазоні напруги [1]. Раптове збільшення зворотного VAR викликається локальним перетином діода, куди тече надлишковий струм. Подальшим підтвердженням цієї версії є значення ефективної напруги пробою U_B^* . Він характеризує локальний розпад перехідної області при високих концентраціях електронів, таких як дислокації в домішковій атмосфері та інші

дефекти дальньої дальності, що проникають у перехідну ОПЕ. Ці факти свідчать про недосконалість межі дифузного рп-переходу. Низька напруга пробою U_B^* для імплантованих фотодіодів, виготовлених відповідно до технологічних режимів № 2 та № 3 (див. Таблицю 5), та значення $m > 0,5$ вказують на локальні місця дефекту з темним струмом при зворотному зміщенні та НМО. . Такі нерівномірні р-п переходи характеризуються надмірним темним шумом типу $1/f$, що робить реалізацію режиму BLIP неможливою.

Таблиця 5. Параметри ВАР InSb фотодіодів при 77 К [22].

№	Режими виготовлення	J_0 , А/см	$R_0 A$, Ом·см ²	β	J_1 , А/см	m	* U_B , В
1.	Дифузія кадмію. Режим дифузії не наведено	$9,0 \cdot 10^{-11}$	$8,2 \cdot 10^7$	1,1	$2,3 \cdot 10^{-7}$	4,2	~1,0
2.	Імплантація іонів Ве. $E_1 = 80$ кеВ, $\Phi_2 = 1 \cdot 10^{14}$ см ⁻² при стаціонарному відпалі $T = 375$ °С упродовж 25 хв. $T_m = 300$ °С	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$9,7 \cdot 10^4$	1,5–1,7	$1,4 \cdot 10^{-6}$	0,7	~1,0
3.	Імплантація іонів Mg ⁺⁺ за тими ж режимами, що і у № 2 при $T_m =$	$4,4 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^4$	1,7	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0,8	~0,5

	300 °C.						
4.	К	Імплантація іонів Mg^{++} за тими ж режимами, що у № 2 при $T_m = 77$	$8,9 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^4$	1,4	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0,5 5,0

Примітка. Параметри для прямої ВАХ J_0 і $\beta = J_0 \exp(eU / \beta kT)$. Параметр R_0A визначається формулою $R_0A = (\beta kT / eJ_0)$. Для зворотного ВАН m показник діапазону зворотного напруги становить 10-100 мВ. J_1 - щільність зворотного струму при $U = -1,1$ В, а U_{B*} - напруга пробою, визначена при $J = 4,4 \cdot 10^{-4}$ А / см². Напруга пробою U_B зазвичай визначається $J = 1,0$ А / см² [2]. Ефективна площа діода становила $A = 150 \cdot 150 \mu m^2 = 2,25 \cdot 10^{-4}$ см².

Тому значення темної щільності струму при зворотній напрузі зміщення $U = -0,2$ В є необхідним для контролю якості переходу, але є недостатнім параметром. Значення параметра зворотного переходу I_{AS} , виконаного імплантацією іонів Mg^{+} в охолоджену мішень, вказує на те, що механізм, через який струм протікає як в прямому, так і в зворотному напругах, є в основному міжгенераційною рекомбінацією. Велика ефективна напруга пробою $U_{B*} = 5$ В вказує на низьку концентрацію дефектів дальньої дальності в переходах OPR, що виникають при імплантації іонів Mg^{+} . Це свідчить про зручність використання при відпалі радіаційних дефектів, оскільки стаціонарний термічний відпал технологічних режимів №2 – №4 був однаковим. При кімнатній температурі імплантації іонів Be і Mg дають значно більші концентрації дальньо- та точкових дефектів при перехідних переходах, викликані зміною фізичних та механічних властивостей.

3. Альтернативне джерело імплантації іонів

Оскільки берилій та його сполуки є дуже токсичними речовинами, особливо в газовій фазі, усі роботи, пов'язані з використанням берилію відповідно до вимог безпеки, повинні виконуватися в ізолюваному одноповерховому приміщенні. Ці особливості імплантації іонів берилію мають істотний вплив на собівартість продукції та призводять до пошуку інших методів виготовлення InSb фотодіодів. Альтернативно, імплантація іонів магнію та цинку використовується як акцептор для утворення $p + -n$ -переходів та як іон сірки та хлору для виготовлення $n + -p$ -з'єднань. [20,22] повідомили про отримання високоякісних фотодіодів InSb шляхом імплантації іонів магнію. У таблиці. На малюнку 5 показані електрофізичні параметри з використанням різних цільових температур. Аналіз даних прямого змінного струму показує певні переваги впорскування при 300 K, але коефіцієнт випрямлення та ефективна напруга пробною майже в чотири рази перевищують $p + -n$ перехід, створений при цільовій температурі 77 K Є. Важливі технічні недоліки у виробництві InSb Імплантація іона імплантації іонів берилію $p + -n$ - це стабільність імплантованого профілю домішки при відносно високій ($\sim 450^\circ \text{C}$) термічній температурі відпалу, виключаючи перехід Неможливо. Межа від зони радіаційного дефекту. У той же час, завдяки термічному відпалу іонів, імплантованих іонами, що імплантуються в інші матеріали групи A3B5, берилієві $p + -n$, профіль сильно залежить від температури термічного відпалу [2]. Профіль

ін'єкції цинку n-InSb залежить від термічного відпалу [26-28]. Тепловий відпал зразків проводили при температурі 350 або 400 ° С протягом 15 хвилин на захисній поверхні зразка. Було встановлено, що ніякого впливу на ефективність активації легуючого речовини не було виявлено в цільовому діапазоні температур 20-200 ° С. При подальшому підвищенні цільової температури спостерігалось різке зниження концентрації. Це показало значне зниження його активації і пояснювалося повторним випаровуванням цинку з поверхні субстрату при цільових температурах > 200 °. С. Експериментально показано, що термічний відпал субстратів без оцинкованого шару цинку не призводить до перетворення типу провідності в досліджуваному цільовому діапазоні температур.

Розглянемо інший підхід у виробництві імплантації фотодіодних іонів InSb, що формує n + -р переходи при імплантації іонів сірки, хлору або фтору p-InSb [31]. Монокристалічний матеріал p-InSb: концентрація Ge (111) отвору становить $p \sim 10^{12} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$ і використовувався як субстрат для імплантації іонів сірки. Дослідження процесу формування шару n + було проведено на матеріалі високої стійкості $p \cong 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, а для формування n + - використовували матеріал з $p = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. р перехід. Поверхня підкладки була створена за стандартним механічним шляхом механічного шліфування та полірування, а пошкоджений шар вилуговувався хімічним поліруванням [31]. Після остаточної хімічної обробки поверхню підкладки захищали шаром SiO₂. Захисний шар був покритий тонкою металевою плівкою, а металева плівка функціонувала як маска, що має вікно та захисний шар, утворений методом фотолітографії, в якому проводилася імплантація. Енергія іонів сірки становила 40 кЕВ, а доза коливалася від $1,25 \times 10^{16} - 5,25 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при цільовій температурі 290 ° С. Було встановлено, що незначна нерівність введенного n + шару відповідає дозі $(1,25 - 6,25) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Значення неідеального коефіцієнта $\beta \cong 1,23$ прямого ВАХ близьке до дифузії та в той же час Зворотний струм характеризується енергетичною залежністю $J \sim U_m$ та $m. = 0,52$ вказує на реалізацію створеного струму. Високе значення напруги пробою $U_B = 10 - 12 \text{ В}$ чітко вказує на високу граничну якість електричного

переходу $n + -p$. Вимірювання переходу VFH показало різкий характер розподілу легуючої сірки в НМО. Іншими словами, експериментальна VFH наблизилася пряму до координат C-2-U. Мале значення зворотного темного струму вказує на невеликий внесок струму витоку поверхні в загальний темний струм $n + -p$ переходу. Що стосується відповідності зворотного струму в режимі BLIP, найкраща щільність струму вибірки при $U = -0,2$ В становить $8 \cdot 10^{-8}$ А / см⁻² при 77 К, що майже на два порядки менше, ніж поточна реєстрація BLIP. Необхідна щільність. Режим [5]. З іншого боку досліджується імплантація іонів сірки, хлору та фтору в субстрати p-InSb, щоб створити можливість контролю $n + -p$ переходів та типів заряду в ZnS або Вплив SiO₂ та його структури MDN на струм витоку. Зазвичай іонну імплантацію проводять через плівку ZnS, енергія якої перевищує 100 кЕВ та дозу $(1,25-6,25) \cdot 10^{14}$ см⁻². Імпантований зразок був відпалений при температурі 350–360 ° С протягом 30 хвилин. Після іонної імплантації тип провідності не перетворювався, і було встановлено, що лише термічний відпал зразка призводив до перетворення імпантованого шару. Встановлено, що після імплантації іонів сірки та кремнію в діелектричному шарі ZnS, SiO₂ утворюється позитивно вбудований заряд лише після термічного відпалу конструкції. Опромінення діелектричних шарів ZnS та SiO₂ іонами хлору та фтору та їх відпал утворюють вбудований негативний заряд. Отже, тип заряду, вбудованого на межу MDS структури ZnS / InSb або SiO₂ / InSb, можна регулювати. Це зменшує струм витоку $n + -p$ переходу, викликаний небажаним зворотним утворенням. Шар. У додатку 1 перераховані основні технічні параметри для фотодіодів, отриманих при імплантації берилію в n-InSb.

4. Моделювання процесу іонної імплантації

4.1. Теорія Линдхарда-Шарфа-Шіотта

Коли виникає проблема легування іонами, негайно виникають питання про глибину проникнення домішок та її просторовий розподіл. На них відповідають теорія пробігу або теорія Линдхарда Шарфа Шіота (LSL). Перше вчення теорії ЛШШ полягає в тому, що, вводячись у тверду ціль, іони, що рухаються, втрачають енергію через два незалежні канали. Перший - зіткнення з ядром, а другий - збудження електронної підсистеми. Тому ми можемо описати наступне співвідношення втрат енергії:

$$\frac{dE}{dx} = -N[S_n(E) + S_e(E)], \quad (10)$$

де N [см⁻³] – число атомів мішені в одиниці, E [кеВ] – енергія іона в точці x , обсягу, $S_n(E)$ [кеВ·см²] – ядерна гальмівна здатність, $S_e(E)$ [кеВ·см²] – електронна гальмівна здатність. Тоді середній повний пробіг іона з початковою енергією E_0 :

$$\langle R \rangle = \frac{1}{N} \int_0^{E_0} \frac{E}{[S_n(E) + S_e(E)]} dE. \quad (11)$$

Тому, якщо відомі енергетична та енергетична залежність S_n і S_e , потік іонів можна обчислити. Розрахунок потужності ядерного гальмування обмежується відомою проблемою зіткнення двох заряджених частинок [3]. Ядро падаючого іона взаємодіє з ядром атома-мішені згідно закону Кулона. Енергія зіткнення при ударі визначається швидкістю падаючих іонів, масою ядер, їх зарядом та цільовою відстані. Роль електронної оболонки враховується через функцію екранування. Оскільки ядра падаючого іона взаємодіють з усіма цільовими ядрами одночасно, результати одиничного зіткнення з відстані прицілювання від нуля до

нескінченності повинні бути інтегровані. З точним вирішенням проблеми відображаються рівняння, що містять тригонометричні функції, що ускладнює отримання кінцевих результатів. Точний розрахунок електронного щита у вигляді потенціалу Томаса-Фермі загалом унеможливорює отримання аналітичного зображення ядерної гальмівної здатності. Тут можливі лише чисельні рішення. Однак якщо висока точність не важлива, цю ситуацію можна спростити, спершу прийнявши її як просту функцію наближення $f = a / r$. Де a - радіус екранування (зазвичай це значення становить приблизно 0,1 ангстрем). Відстань між ядром падаючого іона та атомом цілі, по-друге, міжатомна відстань, враховуючи, що розсіювання під великим кутом, а отже, велика віддача енергії відбувається лише на цільових відстанях нижче а Збільшення на одну або дві цифри. Тому більшість іонів рухаються з великою відстані прицілювання в цільовому міжатомному просторі і зміщуються на малий кут. У цьому випадку рівняння, що описують зіткнення, роблять рівняння алгебраїчними, якщо ви замініте тригонометричні функції або їх аргументи, або зробите їх рівними 1. Це наближення називається нульовим, і в цьому випадку формула ядерної гальмівної здатності не залежить від енергії:

$$S_n^0 = 2,8 \cdot 10^{-15} \cdot \frac{Z_1 Z_2}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}} \cdot \frac{M_1}{(M_1 + M_2)}, \quad (12)$$

де Z_1 і M_1 – порядковий атомний номер і атомна маса іона, Z_2 і M_2 - порядковий атомний номер і атомна маса атомів мішені. У теорії ЛШШ запропонована проста модель для оцінки функції електронного гальма. Цільовий електрон - це газ, який рухається шарами. У цьому випадку гальмування пропорційно швидкості або квадратному кореню кінетичної енергії [20].

4.2. Розрахунок пробігів та профілів впроваджуваної домішки методом Монте-Карло

З розвитком комп'ютерних технологій аналіз та профілі домішок, що вводяться для різних комбінацій цільових іонів, можуть бути обчислені чисельно. Найпопулярнішим є метод випадкової змінної під назвою Монте-Карло. Отримані

таким чином результати були вперше представлені у дослідженні П. В. Павлова та його колег. В останні роки комп'ютерні програми TRIM були визнані у всьому світі (остання зміна називається SRIM). Суть методу Монте-Карло полягає у використанні генератора випадкових чисел, що є важливим для параметричного процесу. Для іонофореzu такий параметр є вільним пробігом між зіткненням падаючого іона та цільовою дистанцією до зіткнення цільового атома. Інші значення, такі як щільність та склад мішені, атомна маса, початкова енергія іонів, енергія переміщення атома цілі, товщина цілі тощо, встановлюються постійними на першому кроці. Комп'ютер відслідковує траєкторію кожного випавшого іона і послідовно вирішує завдання двох зіткнень заряджених частинок. Втрати енергії у вільній області, контактні втрати енергії з атомом цілі, кут відхилення від вихідного напрямку, відхилення атома цілі від вузла (віддача енергії більша, ніж енергія зміщення). Потім ситуація відтворюється у світлі зіткнення, що сталося. Як орієнтир, зупинка зазвичай вважається умовою. Залишкова кінетична енергія рухомих іонів не перевищує енергію переміщення атома-мішені. У цей момент комп'ютер фіксує координати іонів. Остання версія програми TRIM може отримувати інформацію не тільки про розподіл домішок, але і про створене переміщення, розподіл вакансій та проміжних атомів, атомізацію мішені. Для отримання параметрів розподілу домішок та імпантованих точкових дефектів зазвичай необхідно провести ряд тестів, таких як тисячі (враховуючи кількість тестів на початку програми) [20]. У цій білій книзі описано завдання TRIM щодо визначення профілю розподілу Be, що вводиться в InSb без каналізації, та прогнозування очікуваної глибини переходу p-n на основі цього профілю.

5. Технологічний маршрут процесу іонної імплантації

Іонна імплантація (іонне впровадження, іонне легування) - введення домішкових атомів в тверде тіло бомбардуванням його поверхні прискореними іонами. При іонному бомбардуванні мішені відбувається проникнення іонів в глиб мішені. Впровадження іонів стає істотним при енергії іонів $E > 1$ кеВ. Формально іонною імплантацією слід було б називати опромінення поверхні твердого тіла атомами або атомарними іонами з енергією не менше 5-10 енергій зв'язку атома в решітці облучаємої мішені (Тоді до зупинки іон або атом пройде не менше 2-3 міжатомних відстаней, тобто вселиться, "Імплантується" в обсяг мішені). Однак, ми за традицією терміном "Іонна імплантація" називаємо тут більш вузький діапазон енергій - від 5-10 кеВ до 50-100 кеВ. Рухомі частинки в результаті багаторазових зіткнень поступово втрачають енергію, розсіюються і в кінцевому підсумку або відображаються назад, або зупиняються, розподіляючись по глибині. Енергетичні втрати обумовлені як взаємодією з електронами мішені (непружні зіткнення), так і парними ядерними (пружними) зіткненнями, при яких енергія передається атомам мішені в цілому і різко змінюється напрямок руху частинки. При високих енергіях і малих прицільних параметрах ядра, що стикаються зближуються на відстані, меншій радіусів електронних орбіт, і їх взаємодія описується кулоновским потенціалом. При низьких енергіях істотно екранування ядер електронами. Зазвичай окремо розглядають взаємодію рухомого іона з електронами (вільними і на зовнішніх оболонках атомів) і взаємодія між ядрами іона і атома мішені, вважаючи обидва механізми втрат аддитивними, а середу однорідної і ізотропного (теорія Ліндхард-Шарфа-Шіотта, ЛШШ). Теорія передбачає, що питомі втрати енергії з ростом енергії іона в зоні пружних зіткнень проходять через максимум а потім зменшуються. Питомі втрати в непружних зіткненнях з ростом енергії зростають по корінному закону. При дуже великих швидкостях енергіях іон рухається в мішені як голе ядро і питомі втрати енергії зменшуються з подальшим її збільшенням. Траєкторія іона являє собою складну ламану лінію, що складається з відрізків шляху між елементарними актами

розсіювання на великі кути. Функція розподілу стабілізованих іонів по глибині зразка має максимум (відстань точки максимуму від поверхні визначається величиною середнього пробігу іонів даної енергії (Рис 1.)

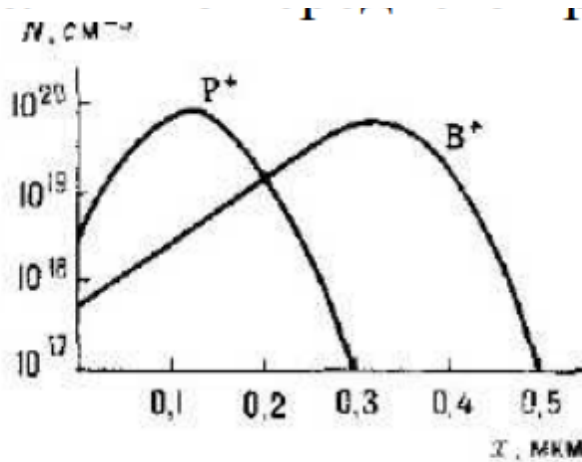


Рис 2. Розподілу по глибині x іонів В і Р, впроваджених в Si: $E = 100$ кеВ, доза іонів 10^{13} см $^{-2}$. Для іонів В $R_{\text{ср}} = 300$ нм, $\Delta R = 73$ нм, для Р $R_{\text{ср}} = 124$ нм, $\Delta = 46$ нм, (N - число іонів 1 см 3).

Важливими характеристиками процесу іонної імплантації є так званий проективний пробіг іона $R_{\text{пр}}$ - проекція траєкторного пробігу на напрямок первонач. руху частинки, а також розподіл імплантованих атомів по $R_{\text{пр}}$, т. е. але глибині x (при бомбардуванні по нормалі до поверхні мішені). Розподіл по x частинок, імплантованих в аморфну мішень, характеризується середнім пробігом $R_{\text{ср}}$ середньоквадратичним розкидом пробігів ΔR та параметром S_k , визначальним асиметрію розподілу Пірсона (Рис.12). Ці величини залежать від M_1 M_2 і ϵ_0 . При $S_k = 0$ розподіл Пірсона переходить в гауссовское. При іонної імплантації в монокристали розподіл впроваджених частинок по глибині може видозмінюватися через каналювання заряджених частинок. Змінюючи в процесі іонної імплантації енергію іонів, можна отримати розподіл впровадженої домішки по глибині бажаної форми. Повне число атомів домішки N , яке може бути імплантовано в твердотельную мішень через одиницю поверхні, обмежується розпиленням, якщо коефіцієнт розпилення S (число атомів мішені, що вибиваються одним іоном) більше частки впроваджуються частинок $\alpha = 1-k$ (k - коефіцієнт відбиття). У нехтуванні дифузії

$$N_n \approx n_s R_{np} \quad (13)$$

де $nS = \alpha n_0 / S$ - концентрація домішки у поверхні в сталому режимі. Якщо $S < \alpha$, концентрація імплантованих атомів буде монотонно зростати зі збільшенням дози іонів.

Найбільш широко Іонна імплантація застосовується для легування напівпровідників з метою створення р-n-переходів, гетеропереходів, низькоомних контактів. Іонна імплантація дозволяє вводити домішки при низькій температурі, в тому числі домішки з малим коефіцієнтом дифузії, створювати пересичені тверді розчини. Іонна імплантація забезпечує точне дозування введеної домішки, високу чистоту (сепарація пучка іонів по масах), локальність, а також можливість управління процесом за допомогою електричних і магнітних полів. Для усунення утворюються при іонної імплантації радіаційних дефектів і перекладу впроваджених атомів в регулярні положення використовують високотемпературний прогрів. Іонну імплантацію в метали застосовують з метою підвищення їх твердості, зносостійкості, корозійної стійкості, створення каталізаторів, зміни коефіцієнта тертя і т. п. При великих дозах, коли концентрація впровадженої домішки порівнянна з n_0 , можливе утворення нових сполук. Іонне бомбардування дозволяє вводити домішка не тільки з пучка, але і з плівки, попередньо нанесеної на поверхню мішені (імплантація атомів віддачі і іонну переміщення). Бомбардування іонами може супроводжуватися нарощуванням імплантируемого матеріалу. Плівки, отримані іонним осадженням, мають високу щільність і гарну адгезію до підкладки. Переваги іонної імплантації:

1. Можливість вводити (імплантувати) будь домішка, будь-який елемент Періодичної Таблиці. Можливість легувати будь-який матеріал.

3. Можливість вводити домішка в будь-якої концентрації незалежно від її розчинності в матеріалі підкладки.

4. Можливість вводити домішка при будь-якій температурі підкладки, від гелієвих температур до температури плавлення включно.

5. Можливість працювати з легуючими речовинами технічної чистоти і

навіть з їх хімічними сполуками (теж будь чистоти).

6. Ізотопна чистота легирующего іонного пучка (тобто можливість легувати не тільки виключно цим елементом, а й винятково даними ізотопом цього елемента).

7. Легкість локального легування (за допомогою хоча б елементарного механічного маскування).

8. Мала товщина легованого шару (менше мікрона).

9. Великі градієнти концентрації домішки по глибині шару, недосяжні при традиційних методах з неминучим дифузійним розмиванням межі.

10. Легкість контролю і повної автоматизації технологічного процесу.

11. Сумісність з планарною технологією мікроелектроніки.

Обмеження, що лімітують можливості іонної імплантації:

1. Можливість вводити будь-яку домішка іноді обмежена властивостями робочої речовини іонного джерела:

- а) занадто висока робоча температура
- б) хімічна або температурна нестійкість,
- в) надмірна токсичність,
- г) корозійна активність.

2. Можливість легувати будь-який матеріал в дійсності означає лише можливість ввести, впровадити атоми легуючого речовини всередину обсягу мішені. Якщо поняття "легування"

означає ще й цілком певне положення в кристалічній решітці мішені, то тут можливості іонної імплантації в багатьох випадках не набагато більше, ніж, наприклад, дифузії. Інше обмеження - радіаційна стійкість матеріалу мішені. Умови опромінення такі, що декомпозиція складних матеріалів має місце при імплантації майже завжди (через випаровування або

розпилення будь-якої компоненти хімічної сполуки).

3. Можливість вводити домішка в будь-якої концентрації обмежена зверху коефіцієнтом розпилення шару. Крім того, домішка, введена понад межі

розчинності, при відпалі дефектів,

як правило, виділяється у вигляді преципітатів другої фази.

4. Низькі температури легування характерні тільки для таких систем, де стан кристалічної решітки несуттєво. Якщо ж порушену грати потрібно відновити після імплантації, то виграш в температурі в порівнянні, наприклад, з дифузійним легуванням стає істотно скромніше.

5. Перевага технічної чистоти легуючих речовин зрідка затьмарюється необхідністю осушки речовини або усунення з нього легкоіонізуючихся сторонніх домішок

6. Ізотопна чистота іонного пучка аж ніяк не означає ізотопної ж чистоти легування.

Перераспилення деталей імплантационної установки швидкими іонами і неконтрольоване вбивання цього розпорошеного речовини в легований шар може істотно зіпсувати властивості шару, тому потрібні хитрощі, для унеможливлення потрапляння на легуємі поверхню сторонніх речовин.

7. Локальність легування при імплантації забезпечується механічним маскированием або накладними трафаретами-масками. Тут неприємність пов'язана з вбивання матеріалу маски в легований шар.

8. Мала товщина легованого шару хороша в мікроелектроніці, але аж ніяк не є гідністю в металургійних застосуваннях.

9. Великі градієнти концентрації домішки по глибині. Розрахункові градієнти (за розподілом пробігів іонів) реально ніколи не виходять з-за розмиття профілю, обумовленого радіаційним стимулюванням дифузії домішки.

10. Легкість контролю і автоматизації процесу у багатьох установках використовується, але до ідеалу - повністю автоматизованої технологічної лінії - ще далеко.

Важливо також пам'ятати, що в даний час Іонна імплантація одна з найбільш дорогих. Отже, іонна імплантація з сепарацією по масам - унікальний за своїми можливостями метод дослідження і модифікації поверхневих шарів. Унікальний і

по спектру легуючих домішок, і по спектру оброблюваних матеріалів, і за діапазоном концентрацій домішки в легованому шарі. Однак ця унікальність хороша тільки для дослідницьких, пошукових цілей. Як тільки виявляються перспективи практичного використання знайдених домішок, концентрацій і товщини легованого шару, так відразу ж треба шукати, випробувати і відпрацьовувати альтернативні технології, забезпечують ті ж або близькі результати.

Іонна імплантація проводиться за допомогою прискорювача іонів. Процес імплантації іонів виконується у пристрої з високим вакуумом, який називається прискорювачем іонів або імплантацією іонів. Основний блок прискорювача схематично показаний на рисунку 2, де показаний типовий тип такого пристрою.

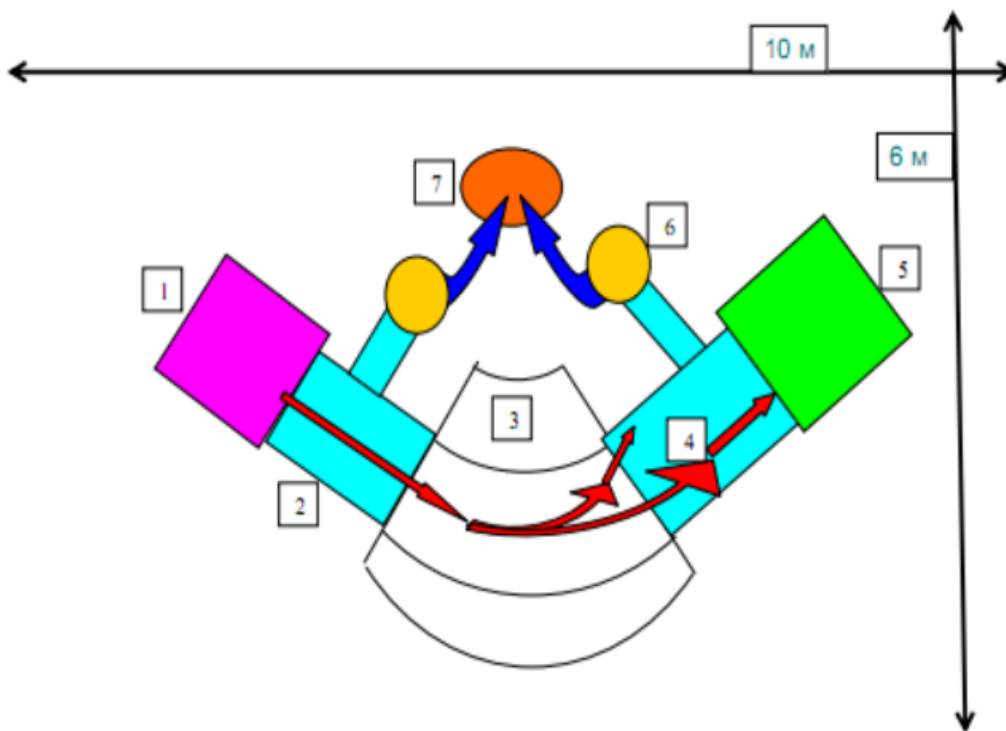


Рис. 3. Схема іонно-променевого прискорювача. 1 – джерело іонів, 2 іонопровод, 3 – магніт мас-сепаратора, 4 – траєкторія іонів, 5 – приймач іонів (колектор), 6 – насоси високого вакууму, 7 – форвакуумний насос. При виконанні іонного впровадження задаються наступні найважливіші параметри:

- У технології легування енергія іонів E , виміряна в кіловольт (кеВ), зазвичай

становить від 1 до 500 кэВ. Кількість енергії визначається напругою прискорення між джерелом іонів та ціллю. Від цього залежить глибина домішки.

- Введення кількості F , одиниця-іон / см^2 (зазвичай використовується в науковій літературі см^{-2}) або $\mu\text{C1} / \text{см}^2$ (перехід від однієї одиниці до іншої в залежності від значення електронного заряду), як правило, інтервал 10^{13} - 10^{15} Іон / см^2 ; від цього залежить концентрація легуючих речовин.
- Іонна щільність струму j , де одиницями є кожен іон / см^2) або $\text{мкА} / \text{см}^2$, значення від $10 \text{ нА} / \text{см}^2$ до $10 \text{ мА} / \text{см}^2$, залежно від типу та функції конструкції джерела іонів; Залежить від часу досягнення правильної допінгової дози. У деяких особливих випадках необхідно встановити температуру введення T . Якщо ви хочете підтримувати температуру нижче кімнатної температури, це здійснюється шляхом продувки пари рідкого азоту через систему охолодження, вбудовану в мішень. У техніці часто потрібно робити «гарячу» ін'єкцію. У цьому випадку ціль нагрівається лампою розжарювання, розміщеною в колекторному пристрої, і її випромінювання направляється до цілі (нагрівання генерується випромінюванням) [20].

6. Аналіз практично отриманих зразків

Спосіб виготовлення фотодіодів на кристалах антимоніда індію n-типу провідності включає підготовку пластини вихідного кристала антимоніда індію, формування p-n переходу імплантацією іонів берилію з постімплантаційним відпалом, нанесення захисної і фізична хімія діелектричних плівок і формування контактної системи. Згідно винаходу використовують пластини вихідного кристала антимоніда індію з концентрацією домішки $6 \cdot 10^{13-2} \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, імплантацію іонів берилію виробляють при енергії 20-40 кеВ і дозі імплантації $(0,8-1,2) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, постімплантаційний отжиг проводять стаціонарно при температурі 350-375 °C протягом 20-30 хвилин з поверхневою капсулюючою плівкою SiO₂. Винахід забезпечує збільшення струмової чутливості фотодіодів на InSb. 1 табл.

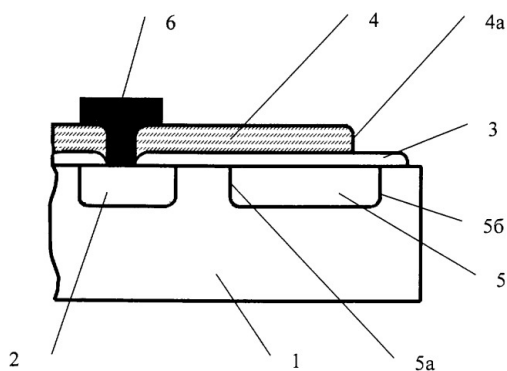


Рис.4. Топологія фрагмента

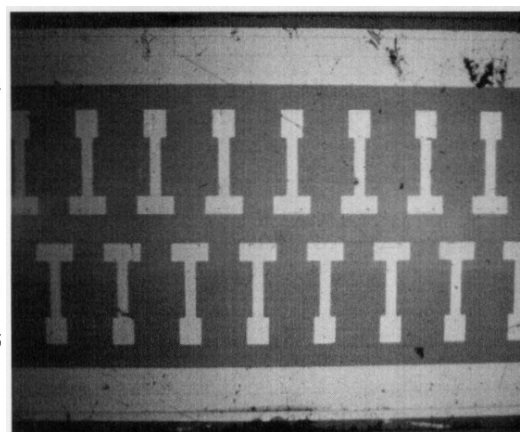


Рис.5. Зовнішній вигляд

Пропонований винахід відноситься до технології виготовлення напівпровідникових приладів, чутливих до інфрачервоного випромінювання,

зокрема одно- та багатоеlementних фотодіодів (ФД) на кристалах антимоніда індію (InSb), і може бути використано при виготовленні лінійних і матричних приймачів випромінювання.

Відомий спосіб виготовлення фотодіодів на антимоніді індію, що включає підготовку поверхні вихідної пластини антимоніда індію, формування локального р-п переходу на підкладці антимоніда індію імплантацією іонів берилію з подальшим відпалом, анодне окислення для формування захисної діелектричної плівки, нанесення пасивуючого діелектрика і формування контактної системи (див. пат. РФ 1589963, МПК 6 H01L 31/18, 1996 г.). Однак цей спосіб не дозволяє виготовляти фотодіоди з найвищою струмового чутливістю.

Відомий найбільш близький за технічною суттю до пропонованого спосіб виготовлення фотодіодів на антимоніді індію, який включає формування р-п переходу на підкладці антимоніда індію імплантацією іонів берилію з енергією іонів 20-100 кеВ і дозою $5 \cdot 10^{11} - 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ з імпульсним постімплантаційним відпалом випромінюванням галогенних ламп, анодне окислення, нанесення плівки SiO₂ х термічним розпиленням і металізацію, причому в якості вихідних використовують кристали з концентрацією легуючої домішки $10^{13} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (див. пат. РФ 2056671, МПК 6 H01L 21/265, 1996 р.). Однак цей спосіб також не дозволяє виготовляти фотодіоди з найвищою струмового чутливістю.

Технічним результатом при використанні запропонованого способу є збільшення струмової чутливості фотодіодів на InSb.

Технічний результат досягається тим, що в способі виготовлення фотодіодів на кристалах антимоніда індію n-типу провідності, що включає підготовку пластини вихідного кристала антимоніда індію, формування р-п переходу імплантацією іонів берилію з постімплантаційним відпалом, нанесення захисної і фізична хімія діелектричних плівок і формування контактної системи, відповідно до винаходу використовують пластини вихідного кристала антимоніда індію з концентрацією домішки $6 \cdot 10^{13} - 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, імплантацію іонів берилію виробляють при енергії 20-40 кеВ і дозі імплантації $(0,8-1,2) \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$, постімплантаційний отжиг

проводять стаціонарно при температурі 350-375 ° С протягом 20-30 хвилин з поверхневою капсулюючої плівкою SiO₂.

Діапазони заявлених концентрацій легуючої домішки у вихідному матеріалі і режими імплантації іонів берилію знаходяться всередині діапазонів, відомих з прототипу значень, проте тільки в зазначеному більш вузькому діапазоні значень забезпечується досягнення технічного результату, на який раніше не був встановлений популярність впливу відмінних ознак, тому заявлене технічне рішення відповідає критерію «винахідницький рівень» (п.19.5.3. (2) «Правил складання, подання та розгляду заявки на видачу патенту на день бретеніе »).

Технічний результат (підвищення струмової чутливості) досягається тільки при поєднанні всіх перерахованих умов і діапазонів значень параметрів, які визначаються наступними фізичними особливостями. ФД на InSb чутливі до випромінювання 3-5 мкм, яке поглинається на глибині відповідно 20-50 мкм. Підвищення струмової чутливості Si обумовлено двома причинами: збільшенням значення дифузійної довжини дірок (L_p), що дозволить дифундувати всім фотонісїв до р-n переходу, розташованого біля поверхні на глибині ~1 мкм, і поліпшенням структурних властивостей самого р-n переходу, що дозволить розділити фотонісїв р-n переходом без помітних втрат на рекомбінацію. Для забезпечення максимального значення L_p вибираються найбільш досконалі кристали і такі режими імплантації та відпалу, які забезпечують найбільшу досконалість р-n переходу і збереження вихідного значення L_p . У свою чергу найбільш досконалими є найменш леговані кристали (найменший рівень легування теллуром промислових кристалів n-типу становить $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) з граничним рівнем концентрації $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, перевищення якого погіршує структурні властивості кристала і зменшує L_p .

До підвищення структурної досконалості р-n переходів на основі InSb, в тому числі легування

Таблиця 6. Параметри легування та відсоток браку зразків.

№ партії	Концентрація легуючої домішки в області легування, см^{-3}	Відстань від р- п переходу до області легування, мкм	Відстань від границі пассивуючої плівки до границі області легування, мкм	% браку*
1 (прототип)	-	-	-	100
2	$4 \cdot 10^{17}$	5	10	60
3	$4 \cdot 10^{17}$	10	5	80
4	$5 \cdot 10^{17}$	10	10	-
5	$5 \cdot 10^{17}$	50	5	60
6	$5 \cdot 10^{17}$	60	5	70
7	10^{18}	5	10	10
8	10^{18}	5	5	50
9	10^{18}	50	5	50
10	10^{18}	50	10	30
11	10^{18}	60	5	70
12	10^{18}	60	10	50
13	10^{19}	5	5	50
14	10^{19}	5	10	20
15	10^{19}	5	5	50
16	10^{19}	50	10	30
17	10^{19}	50	30	20
18	10^{19}	50	5	50
19	10^{19}	60	5	80
20	10^{19}	60	50	70
* - бракувались лінійки фотодіодів, що мають				

більше 5% площі відшарування пасивуючої плівки.

З наведених даних таблиці видно, що виготовлення фотодіодів на основі монокристалу InSb запропонованим способом в заявленому діапазоні значень режимів операцій забезпечує підвищення струмової чутливості одержуваних фотодіодів на ~10% і більше.

З наведених даних видно, що в порівнянні з прототипом застосування заявляється способу дозволяє отримувати придатні за параметром «відшарування ґрунтовки плівки» структури, а при дотриманні заявлених значень параметрів відсоток забракованих лінійок фотодіодів на InSb зменшується на десятки відсотків.

1. Виготовлення фотодіодів на антимоніді індія, включає формування локального р-п переходу на підкладці, анодне окислення для формування захисної діелектричної плівки, нанесення пасивуючої діелектричної плівки і формування контактної системи, яка відрізняється тим, що перед анодним окисленням роблять легування вільних від р-п переходу поверхневих областей підкладки дифузією або іонною імплантацією з постімплантаційним відпалом до концентрації легуючої домішки $5 \cdot 10^{17} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$, причому ближню до р-п переходу кордон області легування не доводять до нього на відстань 5-50 мкм, а нанесення ґрунтовки плівки виробляють не доводячи її на відстань не менше 10 мкм до далекої від р-п переходу кордону області легування.

2. Спосіб виготовлення фотодіодів на антимоніде індія п. 1, який відрізняється тим, що формування локального р-п переходу і легування вільних від р-п переходу областей підкладки виробляють одночасно.

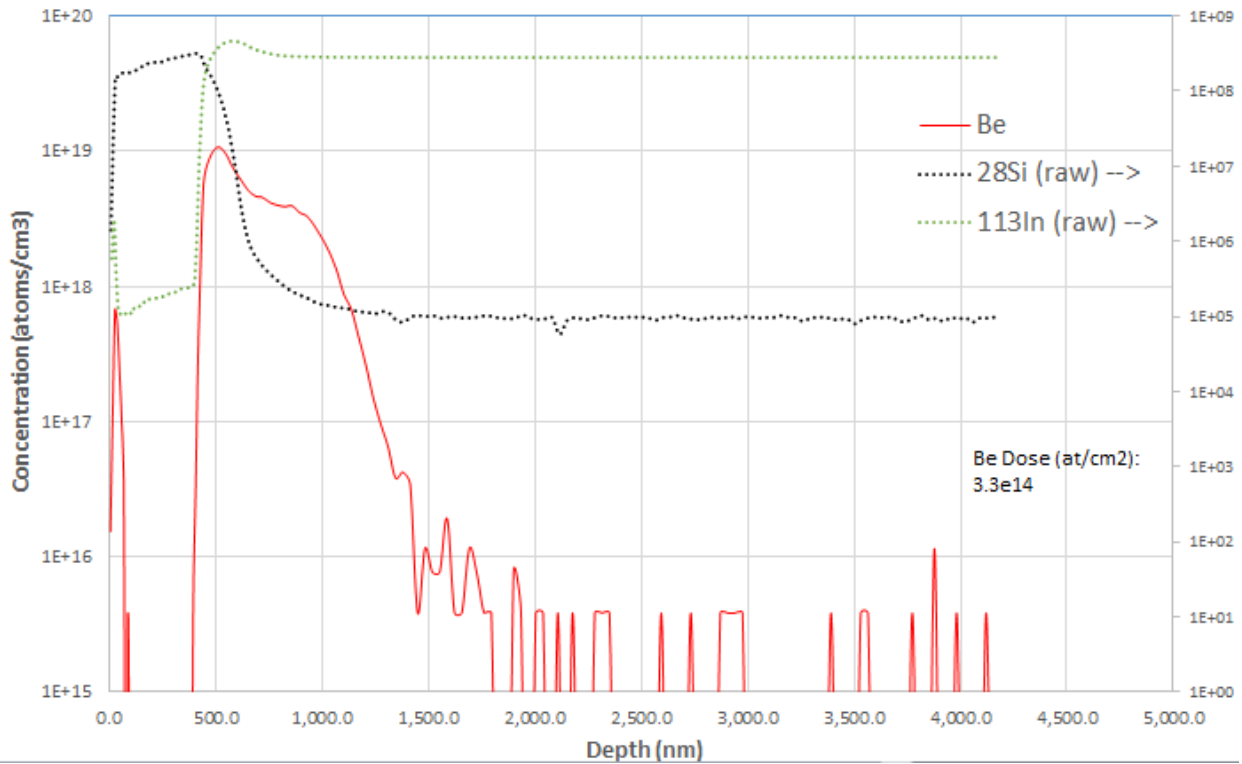


Рис. 6. Профіль легування фотодіода на антимоніді індія.

Проміжний результат профілю легування отримати не має можливості а також сенсу, саме тому на рис.4. було зображено профіль легування вже готового фотодіоду, який пройшов всі етапи виготовлення, тобто попередню підготовку самої підкладки, безпосередньо легування підкладки методом іонної імплантації, формування плівки на поверхні підкладки, металізацію.

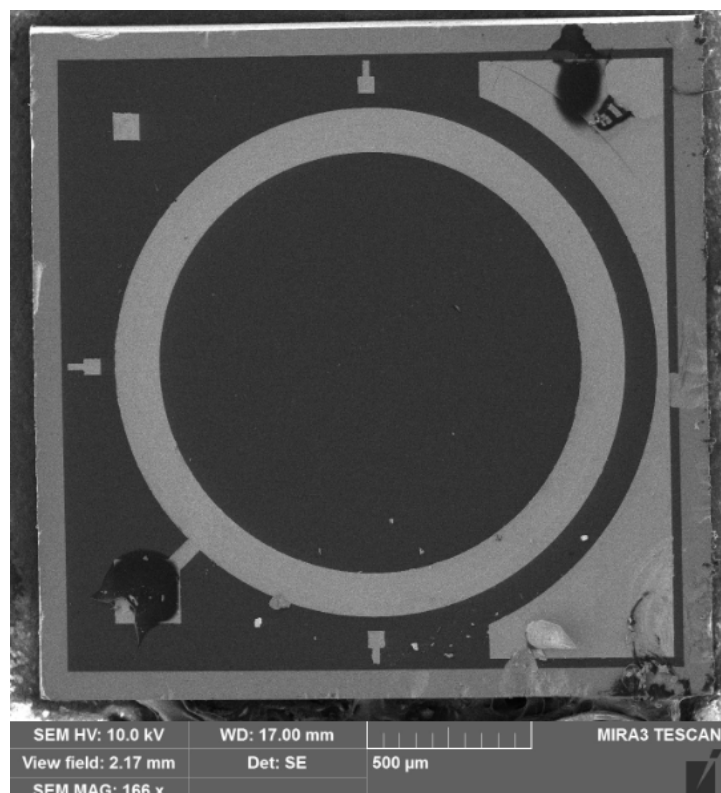


Рис.7. Фотодіод під мікроскопом.

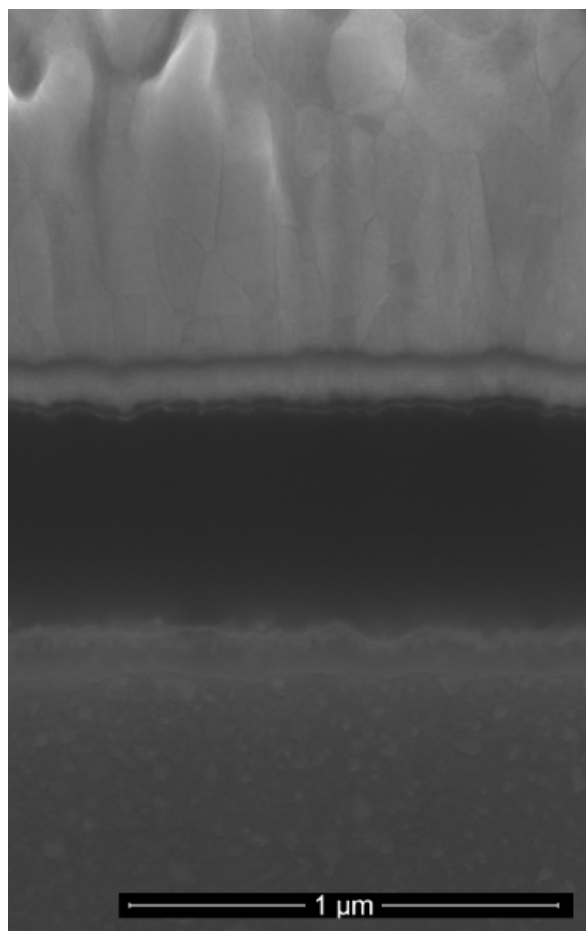


Рис.8. Фотодіод в перерізі.

Фотодіод у перерізі можна побачити за шарами

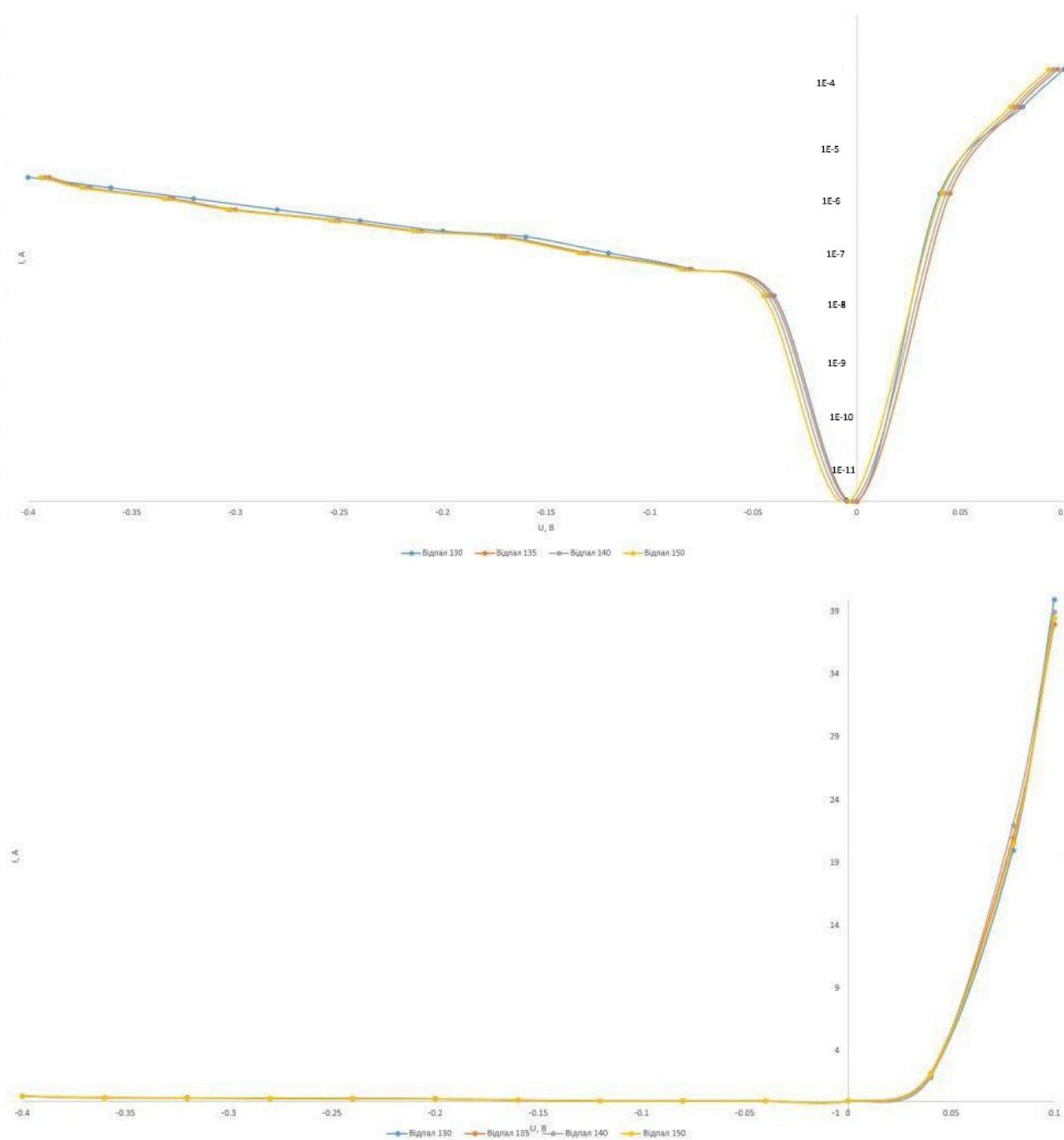


Рис 9 -10. Вольт-амперна характеристика фотодіода.

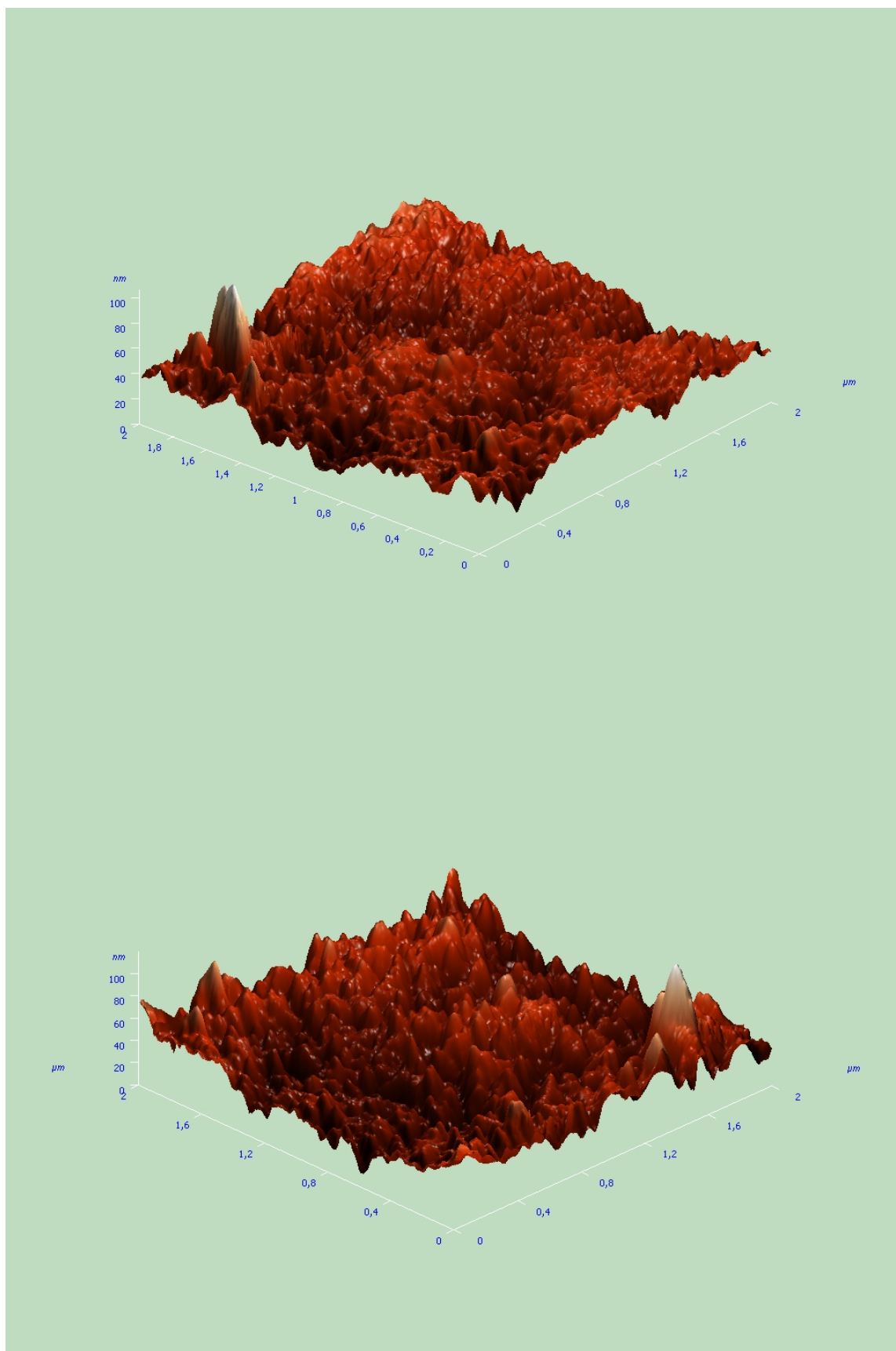


Рис 11-12. 3D-модель залягання домішок у монокристалі

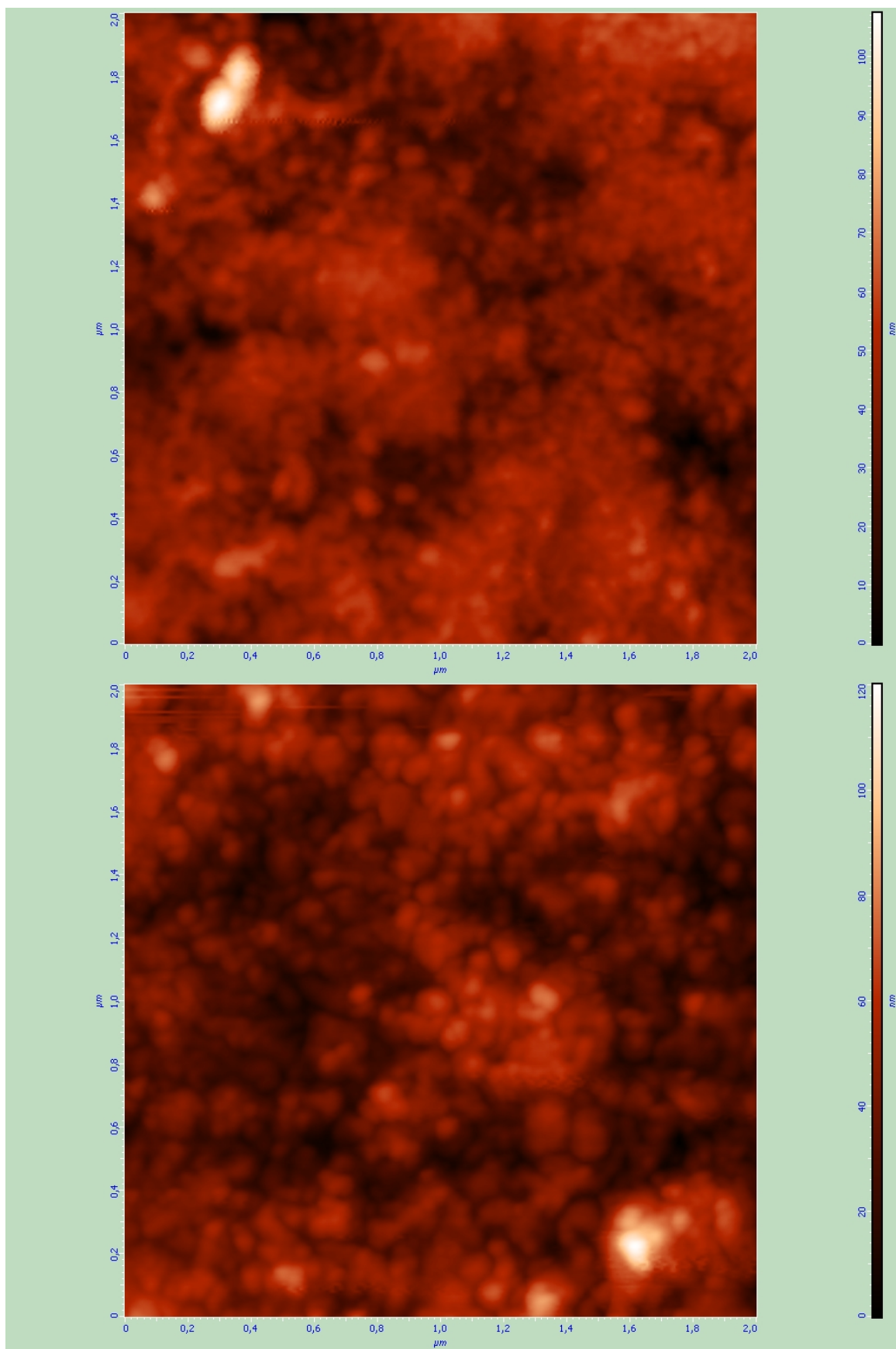


Рис 13-14. Структура монокристаллу 2мкм

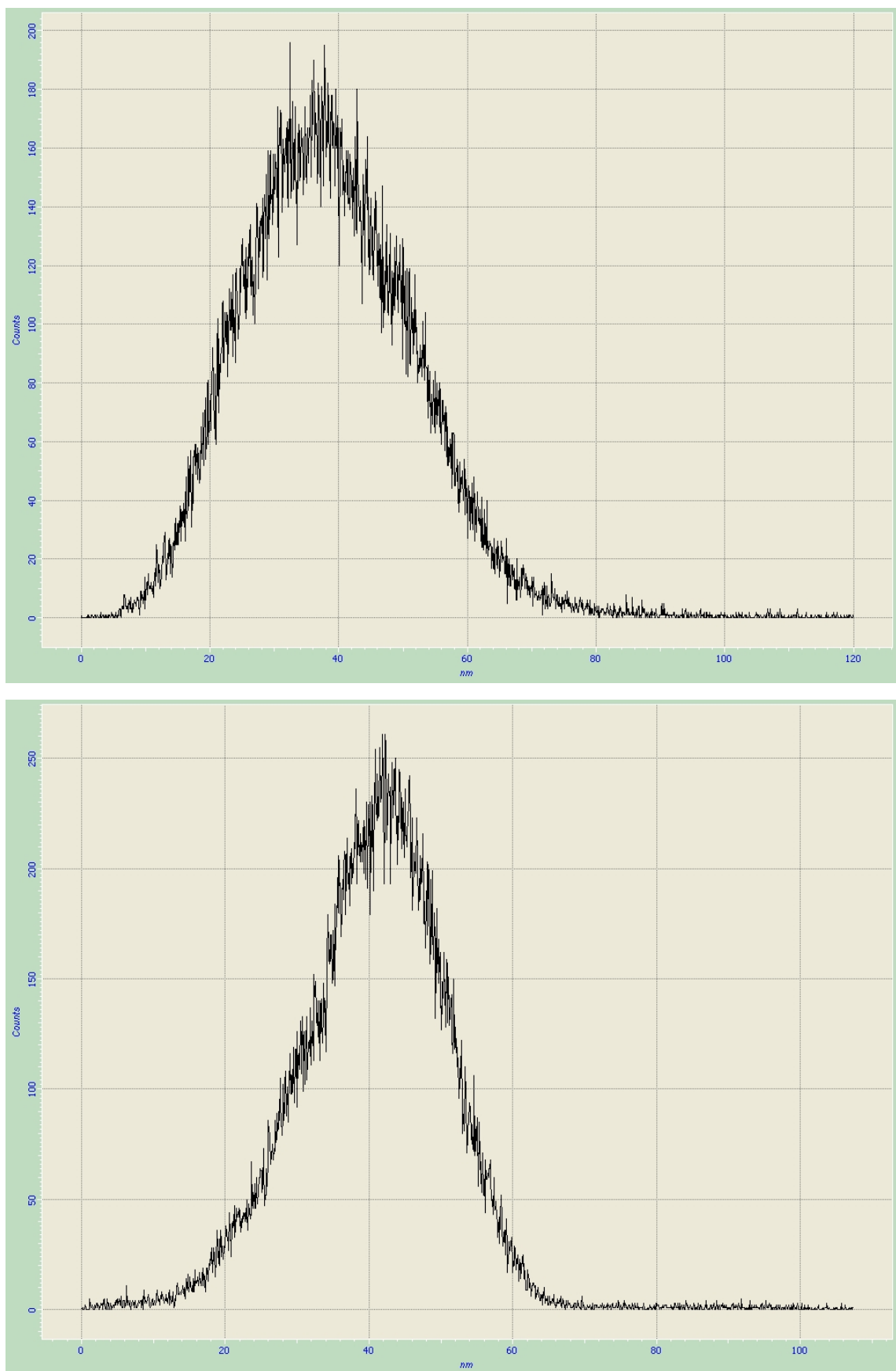


Рис 15-16. Концентрація домішок в залежності від глибини залягання

7. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

7.1 Опис ідеї проекту

Розробимо стартап-проект для подальшої реалізації виробництва продукції для застосування у різних сферах.

Таблиця 7.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Застосування ІЧ-фотодіодів на основі монокристалу антимоніду індія	1. Військова галузь	Підвищення чутливості приладів наведення та виявлення, спрощене користування
	2. Медицина	Підвищення чутливості, та зменшення габаритів приладів обстеження пацієнтів
	3. Енергетика	Підвищення якості приладів для виявлення теплових втрат
	4. Служби порятунку	Ефективніший пошук постраждалих у НС, орієнтація в умовах зменшеної видимості
	5. Транспорт	Орієнтація за умов поганої видимості

1. Економічні 1000 у.о. 500 у.о. 100 у.о. 2000 у.о. +

Фотодіоди, профіль та технологічний шлях яких ми змоделювали відрізняються від існуючих аналогів більшою чутливістю у дальньому ІЧ діапазоні. Маючи декілька конкурентів, ми доведемо свою вигідність та успішність приладобудування.

Конкурент №1: виробник ІЧ-систем наведення «Guidance Marine»

Конкурент №2: компанія-виробник військового ІЧ-обладнання «Reynard Corporation»

Конкурент №3: компанія-виробник ІЧ-детекторів «VISHAY»

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3			

2.	Призначення	Детектор дальнього ІЧ- діапазону	Детектор середнього ІЧ- діапазону	Детектор середнього ІЧ- діапазону	Детектор дальнього ІЧ- діапазону	+
3.	Надійності	Довговічні сть > 10 років	Довговічні сть > 10 років	Довговічні сть > 10 років	Довговічні сть > 10 років	+
4.	Технологічні	Необхідне охолоджен ня	Необхідна наявність охолоджен ня	Необхідна наявність охолоджен ня	Працює без охолоджен ня	+
5.	Ергономічні	-	-	-	-	+
6.	Органолепти чні	-	-	-	-	+
7.	Естетичні	-	-	-	-	+
8.	Транспортаб ельності	-	-	-	-	+
9.	Екологічност і	Екологічн о	Екологічн о	Екологічн о	Екологічн о	+
10.	Безпеки	Безпечно	Безпечно	Безпечно	Безпечно	+

7.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 7.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/ п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Виготовленн я ІЧ- датчика	Іонна імплантація	Наявна	Доступно
		Рідиннофазна епітаксія	Наявна, але не оптимізована під масове виробництво	Доступно

Обрана технологія для реалізації стартап-проекту: Іонна імплантація.

7.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 7.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/ п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	7000 ум.од.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Розгортання великого виробництва
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	190%

Ринок потенційно привабливий для входження, за умов наявності

необхідного фінансування для налагодження великого виробництва.

Таблиця 7.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/ п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Підвищенна чутливість датчиків	Компанії- виробники ІЧ- обладнання (здебільшого для військових цілей)	-	Товар має успішно працювати в дальньому ІЧ- діапазоні

Таблиця 7.6 – Фактори загроз

№ п/ п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Наявність кваліфікованих кадрів	Продукт є наукоємним, саме тому необхідна наявність персоналу зі спеціалізованими навичками	Пошук персоналу у науково-дослідних інститутах та організаціях
2	Потреба в наявності ресурсів	Для налагодження виробництва необхідна наявність приміщень для безпосередньо виробництва та тестування працездатності продукту	Укладання договорів з науково-дослідними інститутами та поставниками ресурсів, оренда приміщень виготовлення та тестування продукту

Таблиця 7.7 – Фактори можливостей

№ п/ п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Сприяє підвищенню якості розробки та виготовленню нових продуктів	Покращення параметрів та характеристик товару, виготовлення нових продуктів
2.	Попит	Існування стійкого попиту говорить про зацікавленість споживача у покращенні якості продукту	Покращення параметрів та характеристик товару, збільшення його вартості

Таблиця 7.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції: - чиста	Існування великої кількості компаній на ринку	Підвищення якості товару за рахунок використання новітніх технологій та залучення кваліфікованого персоналу

2. За рівнем конкурентної боротьби: - міжнародний	Місцезнаходження фірм не обмежується країнами чи територіально	Створювання сайту компанії, відкриття підприємств за кордоном
3. За галузевою ознакою: - внутрішньогалузева	Економічна боротьба між товаровиробниками, які діють в одній галузі економіки, виробляють і реалізують аналогічні товари, що задовольняють одну й ту саму потребу, але мають відмінності у технологічних маршрутах, якості, ціні, тощо	Аналіз та пошук інформації новітніх розробок, новинок, виробництва продукції конкурентів
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Покращення якості та зменшення вартості товару
5. За характером конкурентних переваг: - цінова	Передбачає продаж продукції за нижчими цінами, ніж у конкурентів	Розробка стратегії здешевлення технології виробництва для зменшення вартості продукту
6. За інтенсивністю: - немарочна	Роль торгової марки не є вирішальною	Рекламна компанія продуктів

Таблиця 7.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	«Guidance Marine», «Reynard Corporation», «VISHAY»	Збільшення виробництва	Продаж та збут я товару компанією-Розробником та реалізаторами	Вимоги до якості, надійності і вартості	Товари-замінники відсутні
Висновки:	Висока інтенсивність через давню присутність конкурентів на ринку	Потенційні конкуренти можливі, але не передбачаються	Постачальники не диктують умови роботи на ринку	Висока якість продукту, його надійність та доступність	Обмежень немає

Для здобуття більшої конкурентоспроможності на ринку, при розробці товару необхідно залучати висококваліфікованих спеціалістів у галузі науки та інженерів для вдосконалення технології виробництва, характеристик та якості товару.

Таблиця 7.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/ п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Більша чутливість	Переважна більшість продуктів конкурентів не може зрівнятися за параметрами чутливості
2.	Якість розробки та високі характеристики товару	Продукт має однаково добре виявляти ІЧ-випромінювання за різних погодних умов, кутах нахилу, температури тощо
3.	Наявність наукових ресурсів	Для покращення якості продукції та технології виробництва потрібні наукові ресурси
4.	Економічний (ціна товару)	Ціна продукції не має бути надто висока, щоб знайти потенційних покупців

Таблиця 7.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/ п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з “ЗМ”						
			– 3	– 2	– 1	0	+1	+	+3
1.	Більша чутливість	20		+					
2.	Якість розробки та високі характеристики товару	16			+				

3	Наявність наукових ресурсів	13					+		
4	Економічний (ціна товару)	16				+			

Таблиця 7.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Висока чутливість, якість розробки та високі характеристики товару	Слабкі сторони: Наявність наукових ресурсів
Можливості: Зменшення ціни товару приведе до більшого попиту, а відтак і до збільшення інтересу у подальших наукових дослідженнях	Загрози: Відсутність досліджень для покращення технології приведе до її застою і зрештою, до зменшення попиту на товар

Таблиця 7.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Пошук інвесторів, пошук компаній збуту, налагодження виробництва, пошук наукових ресурсів, вихід на ринок	80%	3 роки
2	Пошук компаній збуту, пошук інвесторів, пошук наукових ресурсів,	50%	5 роки

	налагодження виробництва, вихід на ринок		
--	--	--	--

Обрано альтернативу №1.

7.14 Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 7.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п / п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовніс ть споживач ів сприйнят и продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивн іс ть конкурен ції в сегменті	Просто та входу у сегмен т
1	Державні установи	Висока	Високий	Висока	Середня
2	Приватні підприємст ва	Середня	Середня	Низька	Висока
Які цільові групи обрано: обрано цільову групу №1.					

Таблиця 7.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/ п	Обрана альтернатив а розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможн і позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Військові контракти	За рахунок великої зацікавленості військової сфери у якісних та менш громіздких засобів ІЧ- детектування можна добитися лідерства на ринку військового обладнання	Кращі характеристики товару за меншою ціною	Стратегія спеціалізації

Обрано стратегію спеціалізації.

Таблиця 7.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/ п	Чи є проект «першопрохідцем » на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентн ої поведінки
1.	Ні	Так	Ні	Заняття конкурентно ї ніші

Таблиця 7.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/ п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Висока чутливість , менші розміри	Стратегія спеціалізація	Чутливість, зменшення кількості браку	Оптимальне співвідношення ціна/якість, оптимізоване виробництво, співпраця

Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 7.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/ п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Зменшення розмірів обладнання та залежності від охолодження	Більша чутливість	Конкуренти пропонують менш чутливі системи, за більший кошт

Таблиця 7.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Слугування інкапсулянтном для з'єднання захисного скла із сонячним елементом з підвищенням його ККД		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Підвищення ККД ФЕП	М М	
	2. Ціна 25 у.о./мм ²	М М	
	3. Висока чутливість.		
	4. Охолоджена система.		
	Якість: висока,		
	Пакування: пластини		
Марка: "ERVC"			
III. Товар із підкріплення м	До продажу: гарантія		
	Після продажу: доставка, обслуговування		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патент			

Таблиця 7.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	-	20–50 у.о./мм ²	7000 у.о. і вище	20 – 40 у.о./мм ²

Таблиця 5.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових	Функції збуту, які має виконувати	Глибина каналу	Оптимальна система
-------	--	-----------------------------------	----------------	--------------------

	клієнтів	постачальник товару	збуту	збуту
	Замовлення товару на сайті або безпосередньо у розробників	Встановлення контакту, інформування, розподіл, зберігання, сортування	Канал нульового рівня	Безпосередній збут продукції покупцям від виробника

Таблиця 5.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№	Специфіка поведінки цільових	Канали комунікацій, якими	Ключові позиції, обрані для	Завдання рекламного	Концепція рекламного звернення
---	------------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	------------------------	--------------------------------------

п/п	клієнтів	користуються цільові клієнти	позиціонування	повідомлення	
	Застосування товару у військовій сфері (системи переносних зенітно-ракетних комплексів, голівки самонаведення)	Прямі – інформація передається безпосередньо від інформатора до інформованої особи	Неохолоджувані системи, висока чутливість в ближньому ІЧ діапазоні випромінювання	Поширення знань про підприємство і характеристик товару серед можливих клієнтів	Звернення ґрунтується на відмінностях між рекламованим товаром і тим, що пропонують конкуренти.

5.1. Висновки

Можливість ринкового впровадження та комерціалізації проекту є значною через наявність відмітних характеристик товару та відсутність високої конкуренції на ринку. Першими кроками можуть бути оформлення військових контрактів виробництва таких приладів, для подальшого розвитку виробництва продукції.

Висновки

1. Узагальнено літературні дані з технології InSb фотодіодів, виготовлених методом іонної імплантації берилію в підкладки n -InSb. Проаналізовано вплив основних технологічних операцій при іонній імплантації берилію та магнію в n -InSb, а також способи обробки поверхні підкладок n -InSb, режими імплантації іонів (енергію, дозу, температуру мішені), термовідпал радіаційних дефектів та активацію легуючих домішок.
2. Розглянуто модель конверсії типу провідності n -InSb при термообробці.
3. Розглянуто методи виготовлення фотодіодів з використанням альтернативних джерел іонної імплантації (магнію, цинку, сірки) та наведено їх основні параметри.
4. Проаналізовано перспективні напрями виготовлення InSb фотодіодів.
5. Проаналізовано практично отримані дані виготовлення фотодіодів методом іонної імплантації, також порівняно два способи виготовлення.
6. В порівнянні з прототипом застосування заявляється способу дозволяє отримувати придатні за параметром «відшарування ґрунтовки плівки» структури, а при дотриманні заявлених значень параметрів відсоток забракованих лінійок фотодіодів на InSb зменшується на десятки відсотків.

Список літератури

- 1 Астахов В.П., Гиндин П.Д., Карпов В.В. и др. Результаты разработки фотодиодов на InSb с ультранизкими темновыми токами для высокочувствительных ПЗС. *Прикладная физика*. 1999. №2. С. 73–79.
- 2 Герасименко Н.Н., Гузев А.А., Курышев Г.Л. и др. Применение методов ионного легирования для создания p-n-переходов на InSb и InAs. Новосибирск: Институт физики полупроводников СО АН СССР, 1991. – 40 с. (Препринт 2. Институт физики полупроводников СО АН СССР)
- 3 Bloom I. and Nemirovsky Y. Surface passivation of backside-illuminated indium antimonide focal plane array. *IEEE Trans. Electron. Devices*. 1993. **40**, No. 2. P. 303–313.
- 4 Мирошникова И.Н., Гуляев А.М., Недоруба Д.А. Применение шумовой спектроскопии для прогнозирования надежности приемников ИК-излучения на основе антимонида индия. *Прикладная физика*. 2003. №6. С. 92–97.
- 5 Астахов В.П., Туловчиков В.С., Перевошиков В.А. и др. Материаловедческие особенности создания ионно-планарных фоточувствительных структур на монокристаллах InSb. *Прикладная физика*. 2002. №1. С. 118–128.
- 6 Трохин А.С., Скакун Н.А., Стоянова И.Г. и др. Локализация атомов бериллия в кристаллической решетке антимонида индия при ионной имплантации. *Поверхность. Физика, химия, механика*. 1988. №8. С. 144–146.
- 7 Курышев Г.Л., Мясников А.М., Ободников В.И. и др. Перераспределение бериллия в InSb и InAs при внедрении ионов и последующем отжиге. *ФТП*. 1994. **28**, №3. С. 439–442.
- 8 Перевошиков В.А., Скупов В.Д. *Особенности абразивной и химический обработки поверхности полупроводников*. Нижний Новгород: ННГУ, 1992. 206 с.

- 9 Перевошиков В.А. Процессы химико-динамического полирования поверхности полупроводников.
Высокочистые вещества. 1995. №2. С. 5–29.
- 10 Луфт Б.Д., Перевошиков В.А., Возмилова Л.Н. и др. *Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников*. М.: Радио и связь, 1982. 136 с.
- 11 Даниленко С.Г. Розробка травильних композицій та технологічних процесів формування полірованих поверхонь підкладок арсеніду та антимоніду індію для приладів ІЧ-техніки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2000. 15 с.
- 12 Лукьянчикова Н.Б. *Флуктуационные явления в полупроводниках и полупроводниковых приборах*.
М.: Радио и связь, 1990. 296 с.
- 13 Венгель П.Ф., Томашик В.Н., Фомин А.В. Растворение InSb в растворах системы $\text{Br}_2\text{-HBr-H}_2\text{O}$.
Неорганические материалы. 1996. **32**, №1. С. 23–25.
- 14 Томашик З.Ф., Даниленко С.Г., Томашик В.Н. и др. Взаимодействие арсенида и антимонида индия с водными растворами азотной кислоты. *Неорганические материалы*. 2000. **36**, №2. С. 153–156.
- 15 Томашик З.Ф., Кусяк Н.В., Томашик В.Н. Химическое травление InAs, InSb и GaAs в растворах системы $\text{H}_2\text{O}_2\text{-HBr}$. *Неорганические материалы*. 2002. **38**, №5. С. 535–538.
- 16 Томашик З.Ф., Шелюк И.А., Томашик В.Н. и др. Химическое травление GaAs, GaSb, InAs и InSb, водными растворами системы $\text{H}_2\text{O}_2\text{-HBr}$ -этиленгликоль. *Неорганические материалы*. 2012. **48**, №9.
С. 985–989.
- 17 Мирофьянченко А.Е., Коротаев Е.Д., Яковлева Н.И. Исследование морфологии поверхности полупроводниковых подложек InSb, предназначенных для ИК-фотоэлектроники. *Прикладная физика*. 2014. №3. С. 55–60.

- 18 Кисельова Л.В., Лопухин Ю.С. и др. Влияние режимов химической обработки монокристаллов InSb на состав и структуру поверхности. *Прикладная физика*. 2015. №5. С. 84–89.
- 19 Шелюк І.О. Взаємодія арсенідів і стибідів галію та індію з водними розчинами H_2O_2 – HBr – розчинник: автореф. дис. ... канд. хім. наук. Івано-Франківськ, 2011. 20 с.
- 20 А. с. №784635 СССР. МПКЗ: H01L 21/302 Травитель для химического полирования антимонидов индия и галлия / Л.Б. Хусид, Б.Д. Луфт, И.А. Свердин и Г.А. Дмитриева. № 2799337/18-25; заявл. 20.07.79; опубл. 30.01.82. Бюл. №4.
- 21 Луфт Б.В., Хусид Л.Б., Ясен М.Л. Милевский С.Ю. Химическое полирование антимонидов индия и галлия растворами системы H_2O_2 – HF –молочная кислота. *Изв. АН СССР. Неорган. материалы*. 1984. **10**, №8. С. 1260–1264.
- 22 А. с. №1059033А СССР. МПК: C30B 33/00, C30B 29/40. Полирующий травитель для антимонида индия. Л.П. Сорокина, В.П. Улин. № 3425099/23-26; заявл. 07.12.83; опубл. 16.04.82. Бюл. №45.
- 23 А. с. №521620 СССР. МПК2: H01L 21/30, C23F 1/00. Полирующий раствор для антимонида индия. Е.Н. Приходько, Т.И. Ольховикова, Ф.Р. Хашимов и Н.В. Козлова. № 2018216/25, заявл. 26.02.74; опубл. 15.07.76. Бюл. №26.
- 24 Мазуркевич Я.С., Зозуля Н.И., Костюк Л.С. и др. Травление и некоторые свойства плоскостей (111) InSb. *Изв. АН СССР. Неорган. материалы*. 1975. **11**, №4. С. 613–616.
- 25 Штабнова В.Л., Кировская И.А. Химический состав поверхности соединений InB^V . *Изв. АН СССР. Неорган. материалы*. 1989. **25**, №2. С. 207–211.
- 26 Бриллиантов А.И., Коротков А.В., Новотоцкий-Власов Ю.Ф. Эффект поля на поверхностях (111) и $(1\ 1\ 1)\ p\text{-InSb}$. *Электронная техника. Сер. Материалы*. 1969. №6. С. 61–64.
- 27 Эминов Ш.Ш. Химическое травление поверхности плоскостей {111} InSb при подготовке к жидкостной эпитаксии. *Fizika*. 2009. **15**, No. 2. С. 96–100.

- 28 Korwin-Pawlowski M.L., Heassel E.L. Characteristics of MOS capacitors formed on p-type InSb. *phys. status solidi (a)*. 1974. **24**, No. 3. P. 649–652.
- 29 Landan J.D., Viswanathan C.R. Characterization of improved InSb interfaces. *J. Vac. Sci. Technol.* 1979. **16**, No. 5. P. 1474–1477.
- 30 Hang R.Y., Yon E.T. Surface study of anodised indium antimonide. *J. Appl. Phys.* 1970. **41**, No. 5. P. 2185–2189.
- 31 Лебедев М.В., Shimomura M., Fukuda Y. Реконструкция поверхности InSb(III) при адсорбции серы. *ФТП*. 2007. **41**, №5. P. 539–543.
- 32 Bloom I. and Nemirovsky Y. Surface passivation of backside-illuminated indium antimonide focal plane array. *IEEE Trans. Electron. Devices*. 1993. **40**, No. 2. P. 303–314.
- 33 Kow-Ming Chang, Jiunn-Jue Luo, Chen-Der Chiang et al. Mesa etching characterization of InSb for high density image array application. *J. Chin. Institute Eng.* 2007. **30**, No. 1. P. 11–16.